



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Projeto Piloto de Compostagem Acelerada

CATARINA DO SOUTO PARADELA

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente

ORIENTADOR ACADÉMICO:

Manuel Fernando Ribeiro Pereira

Diretor de Curso de Mestrado Integrado Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Presidente da Comissão Científica Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Presidente da Comissão de Acompanhamento de Curso Mestrado Integrado em Engenharia
do Ambiente

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2013/2014

Editado por:

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

Correio eletrónico: feup@fe.up.pt

Endereço eletrónico: <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente – 2013/2014 – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

***“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará
ao seu tamanho original.”***

Albert Einstein

*Aos meus pais e irmão,
Por todo o Amor, Carinho e Compreensão,
Por todas as palavras de encorajamento...
Sem vocês nada disto seria possível.*

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação não teria sido possível sem a ajuda, apoio, incentivo e amizade de diversas pessoas que me acompanharam e contribuíram direta e indiretamente ao longo destes meses, bem como do meu percurso académico. Assim sendo, agradeço-vos a todos por esse contributo de uma forma muito especial.

Ao meu orientador professor Fernando Pereira um sincero obrigada pelo apoio, disponibilidade e motivação que me permitiu explorar diversos ângulos ao longo do trabalho procurando sempre enriquecer o mesmo. Obrigada pela liberdade e autonomia oferecida e pelo incentivo para procurar sempre atingir os melhores resultados possíveis.

Aos Engenheiros Cristina Nunes e Luís Martins por tudo aquilo que fizeram por mim ao longo deste projeto. Obrigada por me terem feito uma visita à casa e me darem toda a ajuda possível para conseguir atingir os resultados obtidos. Um sincero agradecimento pelo apoio incondicional que me deram, pelas horas perdidas a pensar em formas de me ajudar a otimizar o projeto e por tudo o resto que fizeram por mim ao longo desta etapa.

À Engenheira Liliana Pereira um sincero agradecimento por me ter aberto as portas do seu laboratório e me ter disponibilizado todos os equipamentos, materiais e conhecimentos. Sem dúvida que o seu apoio e disponibilidade foi essencial para a concretização deste projeto.

Dona Maria do Céu e Mara, muito obrigada às duas pela disponibilidade e ajuda sempre demonstrada no Laboratório. Senhor Ramiro um sincero agradecimento pela ajuda disponibilizada para triturar os resíduos bem como todo o apoio cedido posteriormente. Senhor Rui, sem dúvida que a sua ajuda foi imprescindível para completar o sistema de aquisição de dados, muito obrigada pelos conhecimentos a nível de instalações elétricas que me forneceu. Ao senhor Júlio, um grande obrigada por me ter emprestado os materiais necessários para o carregamento do reator. Também quero mostrar um sincero agradecimento ao senhor Aníbal por toda a mão-de-obra fornecida em diversas tarefas realizadas. Não esquecendo naturalmente a Dona Rosa e o Senhor António que sempre que as condições climáticas o permitiram me trouxeram a matéria-prima necessária para este processo de compostagem.

À Alexandra um sincero obrigado por toda a disponibilidade e paciência demonstrada durante a realização dos ensaios de Análise Elementar não esquecendo também um sincero agradecimento à Carmen por toda a disponibilidade e conhecimentos partilhados ao longo do projeto.

À professora Olga Nunes pela disponibilização do laboratório e das instalações, pelos documentos facultados para melhorar estes resultados e por todo o apoio disponibilizado a nível da análise microbiológica.

Um sincero agradecimento também para as pessoas da Microbiologia que me ajudaram em diversos pontos para garantir a realização destes ensaios. Um enorme agradecimento pelo tempo e conhecimentos despendidos. Muito obrigada Engenheiras Sílvia, Carla e Paula.

Muitos outros merecem ser aqui referidos pelo apoio demonstrado ao longo deste trabalho, dos quais vou referir o professor Rui Boaventura pela cedência dos equipamentos para a análise da presença dos metais; a professora Joana Dias pelas

conversas que tivemos sobre compostagem e também à professora Sílvia Pinho pela cedência dos equipamentos do seu laboratório sempre que foi necessário.

Aos amigos que sempre estiveram presentes, apoiaram, ouviram e aconselharam tanto nos bons como nos maus momentos. Um agradecimento especial à Joana e à Tixa porque os anos passam mas as coisas boas mantêm-se.

Aos meus primos e tios que sempre se preocuparam com o percurso que estava a tomar e com as minhas escolhas ao longo dele. Um sincero obrigado pelo apoio, incentivo e animo que me deram ao longo destes cinco anos.

Aos meus pais, sem úvida que não poderia esquecer este agradecimento. O meu muito obrigado por todas as conversas, momentos, discussões que fazem de mim a pessoa que sou hoje. Obrigada por estarem sempre presentes apesar da distância que nos separou ao longo destes anos. Obrigada pelo incentivo, pela força, pela garra que me deram que permitiu que estes 23 anos de vida fossem repletos de vitórias. Um obrigado especial pela paciência que tiveram ao longo destes últimos meses que foi essencial para o término desta dissertação. Um obrigado também para ti Rafa, por para além de um irmão teres sido um amigo ao longo destes tempos que me soube ajudar a levantar em todos os maus momentos.

A ti André, obrigada pela companhia a escrever esta dissertação, obrigada pelo apoio, carinho e companheirismo. Espero sinceramente que continues a fazer parte desta caminhada.

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de realizar o arranque de um reator de compostagem existente nas instalações da Faculdade de Engenharia procedendo ao dimensionamento do respetivo sistema de arejamento e sistema de aquisição de dados.

O estudo consistiu essencialmente na avaliação de diversos parâmetros em 2 cenários distintos, sendo que a diferença entre os mesmos seria a adição de água ao reator. Durante o processo procedeu-se à determinação de diversos parâmetros, nomeadamente o teor de humidade, o teor da matéria orgânica, o pH, a condutividade elétrica, a densidade, a carência bioquímica de oxigénio, o Free Air Space; paralelamente procedeu-se à medição em contínuo da temperatura.

A instalação laboratorial consistia num reator de grandes dimensões com um volume de 2,661 m³, aberto na superfície superior por onde se realizou a alimentação do material a compostar. A recolha do material degradado seria realizada pela zona inferior (cónica) e este seria depois colocado no exterior a maturar. O substrato era constituído apenas por relva fresca recolhida dos espaços verdes da Faculdade, uma vez que o reator havia sido construído para criar uma solução melhor para os resíduos verdes produzidos.

Os resultados obtidos não foram muito satisfatórios principalmente ao nível do teor de carbono orgânico e razão carbono/azoto; no entanto, em relação a outros parâmetros como o teor de humidade os resultados foram de encontro ao esperado tendo em conta a literatura consultada. Os valores de carbono/azoto do substrato utilizado foram inferiores aos valores indicados como ótimos para o processo de compostagem o que poderá justificar alguns dos resultados incoerentes com a literatura obtidos ao longo desta dissertação.

Em relação às temperaturas registaram-se variações ao longo do reator vertical; no entanto, nem sempre estas variações foram de encontro ao expectável muito por causa do sistema de arejamento selecionado para o efeito que provocou a formação de uma camada de resíduos impermeável e compacta que afetou o comportamento da temperatura.

Foi também realizada a determinação dos metais pesados numa amostra de matéria orgânica presente 20 dias no reator tendo-se observado que nenhum dos metais analisados se encontrava no composto em concentrações superiores aos limites indicados no regulamento utilizado como base de referência em Portugal. Realizou-se também uma análise microbiológica de fungos, heterotróficos e actinomicetes para três temperaturas do reator representativas de diferentes fases de degradação e realizou-se ainda a análise e comparação dos coliformes fecais e enterecocos para uma amostra representativa do produto final obtido do reator.

Realizou-se ainda o teste de crescimento ao composto após alguns dias de maturação tendo-se utilizado azevém ao invés de agrião visto que as experiências realizadas com o agrião não foram bem-sucedidas.

Palavras Chave: Compostagem; Relva; Escala Piloto; Reator vertical; Modo Contínuo

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of making the startup of a composting reactor at the facilities of the Faculty of Engineering, including the design of the respective ventilation system and data acquisition system.

The study consisted mainly in the evaluation of various parameters under to 2 different scenarios, where the difference between them was the addition of water to the reactor. During this work, several parameters were determined, namely, the moisture content, the organic matter content, pH, electrical conductivity, density by pycnometer, biochemical oxygen demand and Free Air Space; at the same time the temperature was monitored continuously.

The laboratory facility consisted of a reactor of large dimensions with a volume of 2.661 m³, open on the top surface through which the material to be composted was fed. The degraded material was collected by the lower zone (conical) and then placed outside to complete the maturation. The substrate was composed only of fresh grass collected from the green spaces of the Faculty, since the reactor had been built to create a better solution to process the green wastes produced every year at FEUP.

The results were not very satisfactory mainly at the level of the organic carbon content and carbon/nitrogen ratio; however, for the other parameters such as the moisture content, the results were in line with the expected values when compared to the literature. The values of the carbon/nitrogen ratio of the substrate used were much lower than the values given in the literature, which may justify some of the inconsistent results obtained.

In the case of temperature, some variations were identified along the reactor; however, these variations were not always the expected ones because the ventilation system selected originated the formation of a waterproof and compact layer of wastes, which affected the temperature behavior.

The determination of heavy metals was performed in a sample of organic matter after 20 days in the reactor, and none of the metals analyzed was detected in the compost in concentrations higher than those considered as limit in regulation used as reference in Portugal.

A microbiological analysis of fungi, heterotrophic and actinomycetes was performed for three temperatures of the reactor, representing different stages of degradation. In addition, faecal coliforms and enterococcus analyses were also carried out for a representative sample of the final product obtained from the outlet of the reactor.

The test of growth to the compost after a few days of maturation was performed using ryegrass instead of watercress since the experiences with the watercress were not successful.

Key words: Composting; grass; Pilot Scale Reactor; vertical; Continuous Mode

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	VALORIZAÇÃO ORGÂNICA EM PORTUGAL	2
1.2	CARATERIZAÇÃO DO PROJETO	4
1.3	COMPOSTAGEM	5
1.3.1	CONCEITOS	5
1.3.2	DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO	6
1.3.3	ETAPAS DO PROCESSO	9
1.4	TECNOLOGIAS DE COMPOSTAGEM	9
1.4.1	SISTEMA DE LEIRAS REVOLVIDAS	10
1.4.2	SISTEMA DE LEIRAS ESTÁTICAS AREJADAS	11
1.4.3	SISTEMAS FECHADOS OU REATORES BIOLÓGICOS (IN-VESSEL)	12
1.5	VANTAGENS E DESVANTAGENS - TECNOLOGIAS	14
1.5.1	SISTEMA DE LEIRAS REVOLVIDAS	14
1.5.2	SISTEMA DE LEIRAS ESTÁTICAS AREJADAS	15
1.5.3	SISTEMAS FECHADOS OU REATORES BIOLÓGICOS (IN-VESSEL)	16
1.6	RESUMO DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE COMPOSTAGEM.....	16
1.7	VANTAGENS E DESVANTAGENS - COMPOSTAGEM	18
1.8	CONTROLO DO PROCESSO	19
1.8.1	MICROORGANISMOS.....	20
1.8.2	OXIGÉNIO E AREJAMENTO	20
1.8.3	TEMPERATURA	21
1.8.4	TEOR DE HUMIDADE.....	23
1.8.5	RAZÃO C/N	24
1.8.6	GRANULOMETRIA DO MATERIAL	24
1.8.7	PH.....	25
1.8.8	CONDUTIVIDADE.....	26
1.9	COMPOSTO	27

1.9.1	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO COMPOSTO	27
2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
2.1	DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZADA	34
2.2	SISTEMA DE AREJAMENTO	37
2.3	INSTRUMENTAÇÃO	39
2.4	ALIMENTAÇÃO DO REATOR.....	42
2.5	PLANO DE AMOSTRAGEM	43
2.5.1	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE	44
2.5.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.....	44
2.5.3	DETERMINAÇÃO DO PH	44
2.5.4	DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	44
2.5.5	DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA - P	44
2.5.6	CARÊNCIA QUÍMICA DE OXIGÊNIO – CQO	44
2.5.7	DETERMINAÇÃO DO FREE AIR SPACE	44
2.5.8	DETERMINAÇÃO DA RAZÃO C/N PELA ANÁLISE ELEMENTAR	45
2.5.9	DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS	45
2.5.10	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS	45
3	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
3.1	ARRANQUE DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM	47
3.1.1	TEMPERATURA	48
3.1.2	CARACTERIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO	49
3.2	FUNCIONAMENTO EM CONTÍNUO.....	50
3.2.1	TEMPERATURA	51
3.2.2	TEOR DE HUMIDADE – H (%)	54
3.2.3	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA – MO (%)	56
3.2.4	pH	57
3.2.5	CONDUTIVIDADE.....	59
3.2.6	FREE AIR SPACE E MASSA VOLÚMICA	61

3.2.7	CARÊNCIA QUÍMICA DE OXIGÊNIO.....	62
3.2.8	RAZÃO CARBONO/AZOTO	64
3.3	DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS	66
3.4	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA	67
3.5	QUALIDADE DO COMPOSTO – TESTE DE CRESCIMENTO.....	71
4	CONCLUSÕES.....	73
5	PERSPETIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
6	BIBLIOGRAFIA.....	77
7	ANEXOS.....	81
7.1	ANEXO I.....	81
7.2	ANEXO II	83
7.3	ANEXO III	88
7.4	ANEXO IV	89
7.5	ANEXO V	91
7.6	ANEXO VI	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Hieraquia de gestão de resíduos	1
Figura 1.2 - Distribuição dos destinos dos Resíduos Urbanos em Portugal Continental (2012)	2
Figura 1.3 - Comparação de resíduos valorizados entre diferentes países	3
Figura 1.4 - Distribuição geográfica das infraestruturas em Portugal Continental	4
Figura 1.5 - Fases do processo de compostagem em função da temperatura	6
Figura 1.6 - Fases da compostagem	7
Figura 1.7 - Esquema geral do processo de compostagem	7
Figura 1.8 - Intervalos de temperatura suportados pelos vários tipos de microrganismos	8
Figura 1.9 - Sistema de leiras revolvidas	11
Figura 1.10 - Sistema de leiras estáticas com arejamento por sucção.....	12
Figura 1.11 - Reator vertical descendente	13
Figura 1.12 - Reator horizontal ou em canal	13
Figura 1.13 - Diagrama dos principais fatores que afetam a decomposição dos substratos.....	19
Figura 1.14 - Curva teórica das necessidades de oxigénio ao longo de um processo de compostagem	21
Figura 1.15 - Variação da temperatura durante o processo de compostagem orgânica	22
Figura 1.16 - Efeito de diferentes percentagens de humidade na degradação da matéria orgânica	23
Figura 1.17 - Efeito da variação da razão C/N	24
Figura 1.18 - Relação entre o diâmetro das partículas e a atividade dos microrganismos.....	25
Figura 1.19 – Curva das principais variações de pH durante a compostagem	26
Figura 2.1 - Fotografia frontal da instalação de compostagem.....	36
Figura 2.2 - Fotografia da tubagem perfurada e do sistema de arejamento adotado	37
Figura 2.3 - Layout obtido para a medição da temperatura – Compostagem	40
Figura 2.4 - Esquema de Labview para aquisição de temperatura – Compostagem	40
Figura 2.5 - Esquema de instrumentação - Reator de Compostagem	41
Figura 3.1 - Evolução da temperatura após carregamento completo do reator	48
Figura 3.2 - Evolução da temperatura no reator em modo contínuo	51
Figura 3.3 - Valores obtidos em °C para um determinado dia para as duas alturas consideradas na análise (1,18 e 1,80 m respetivamente)	52
Figura 3.4 - Temperaturas medidas manualmente ao longo de um determinado período de tempo	52

Figura 3.5 - Evolução da temperatura no reator em modo contínuo – Cenário II.....	53
Figura 3.6 - Variação da % de humidade ao longo dos 4 pontos de amostragem	54
Figura 3.7 - Variação da % de humidade ao longo do tempo – Cenário II.....	55
Figura 3.8 - Variação do teor de matéria orgânica ao longo dos 4 pontos de amostragem	56
Figura 3.9 - Variação do teor de matéria orgânica – Cenário II	57
Figura 3.10 - Variação do pH ao longo dos 4 pontos de amostragem	58
Figura 3.11 - Variação do pH – Cenário II	59
Figura 3.12 - Variação da condutividade elétrica ao longo dos 4 pontos de amostragem	59
Figura 3.13 - Variação da condutividade elétrica – Cenário II.....	60
Figura 3.14 - Variação do Free Air Space ao longo dos 4 pontos de amostragem	61
Figura 3.15 - Variação da massa volúmica ao longo dos 4 pontos de amostragem	61
Figura 3.16 - Variação da CQO ao longo dos 4 pontos de amostragem	63
Figura 3.17 - Variação do CQO – Cenário II	63
Figura 3.18 - Valores de Carbono/azoto obtidos para as diferentes amostras	64
Figura 3.19 - Valores de Carbono/azoto obtidos para as diferentes amostras – Cenário II	65
Figura 3.20 - Fotografias do teste de Crescimento do azevém após 14 dias de crescimento.....	72
Figura I.1 - Layout obtido para a medição da temperatura – Digestão anaeróbia	81
Figura I.2 - Esquema de Labview para aquisição de temperatura – Digestão anaeróbia.....	81
Figura I.3 - Esquema de Labview para aquisição de temperatura – Digestão anaeróbia	82
Figura I.4 - Esquema de Labview para aquisição de pH – Digestão anaeróbia	82
Figura III.1 - Calcinação de amostras na mufla	88
Figura III.2 - Equipamento determinação metais pesados	88
Figura III.3 - Análise microbiológica - filtração.....	88
Figura III.4 - Técnica de picnometria	88
Figura III.5 - Amostras no exsicador	88
Figura III.6 - Caixas de Petri com meios de cultura	88
Figura IV. 1 - % de Carbono obtidas para as diferentes amostras	89
Figura IV.2 - % de Azoto obtidas para as diferentes amostras	89
Figura IV.3 - % de Carbono obtidas para as diferentes amostras – Cenário II.....	90
Figura IV.4 - % de Azoto obtidas para as diferentes amostras – Cenário II	90

Figura V.1 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para <i>Actinomicetes</i>	91
Figura V.2 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para <i>Fungos</i>	91
Figura V.3 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para <i>Heterotróficos</i>	91
Figura V.4 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para <i>Enterococos</i>	92
Figura V.5 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para <i>Coliformes</i>	92
Figura VI.1 - Fotografia de cogumelos dentro do reator	93
Figura VI.2 - Fotografia da zona compacta formada à volta do sistema de arejamento	93
Figura VI.3 - Pilha de composto após esvaziamento total do reator	93
Figura VI.4 - Fotografia de Azevém após 14 dias de ensaio.....	93
Figura VI.5 - Fotografia de composto após 20 dias no reator.....	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Infraestruturas e equipamentos existentes em Portugal Continental	4
Tabela 1.2 - Sumário dos principais sistemas de compostagem, adaptado de Tchobanoglous et al (1993).....	17
Tabela 1.3 - Interpretação dos resultados da produção relativa, em ensaios de vaso segundo Gonçalves e Batista (2001)	32
Tabela 1.4 - Classes de estabilidade para composto adaptado de LAGA – Merkblatt M 10 (1995)	33
Tabela 1.5 - Classes de estabilidade para compostos segundo Gonçalves e Baptista (2001)	34
Tabela 2.1 - Dados necessários para o cálculo do volume teórico do reator	36
Tabela 2.2 - Características de alguns resíduos disponíveis na faculdade para o processo de compostagem	44
Tabela 3.1 - Parâmetros analisados para a relva.....	52
Tabela 3.2 - Valores registados para uma amostra de material após 20 dias no reator e valores limite comparativos	69
Tabela 3.3 - Análise microbiológica – Actinomicetes	71
Tabela 3.4 - Análise microbiológica – Fungos.....	71
Tabela 3.5 - Análise microbiológica – Heterotróficos	72
Tabela 3.6 - Análise microbiológica – Coliformes totais e Enterococos no composto.....	72
Tabela 3.7 - Análise microbiológica – Contagens UFC	73

NOTAÇÃO E GLOSSÁRIO

INE - Instituto Nacional de Estatística

RU - Resíduos Urbanos

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

EU - União Europeia

PERSU 20 - Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

SV - Sólidos Voláteis

IG - Índice de Germinação

IC - Índice de Crescimento

AH - Ácidos Húmicos

AF - Ácidos Fúlvicos

M - Massa molecular

CQO - Carência Química de Oxigénio

CBO₅ - Carência Bioquímica de Oxigénio a 5 dias

Ms - Matéria seca

Mo - teor de matéria orgânica

ρ_p - massa volúmica partículas

ρ_c - massa volúmica cinzas

UFC - Unidades formadoras de colónias

AWWA - American Water Works Association

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos acompanharam desde sempre a evolução do ser Humano. Apesar disso, apenas surgiu a necessidade de gerir, tratar e eliminar de forma adequada os resíduos gerados pelo Homem quando as cidades se desenvolveram e a população aumentou exponencialmente, (Levy, 2006).

O desenvolvimento tecnológico verificado ao longo do século XX resultou numa utilização desmesurada dos recursos e modificou os padrões de consumo das populações, originando enormes quantidades de resíduos bastante variados, tornando a sua gestão cada vez mais difícil e problemática. A proveniência dos resíduos é muito variada pois está associada a toda a atividade humana. Com o objetivo de garantir a sustentabilidade das gerações futuras, torna-se urgente e obrigatório implementar medidas que minimizem os impactos ambientais negativos. Nesse sentido, muitas pesquisas científicas e tecnológicas têm sido efetuadas, para que sejam desenvolvidas novas técnicas, que trarão benefícios não só do ponto de vista ecológico mas também do ponto de vista social e económico, (Formosinho, 2010).

A classificação dos resíduos pode ser realizada quanto à sua origem em resíduos urbanos, resíduos industriais, resíduos hospitalares, resíduos agrícolas e resíduos de construção e demolição. No entanto, surgiu a necessidade de elaborar uma abordagem que não fosse exclusivamente em relação à sua origem tendo-se criado desta forma os conceitos de fileiras e fluxos de resíduos. As fileiras correspondem ao tipo de material constituinte dos resíduos (fileira do vidro, do papel e cartão, dos plásticos, dos metais e da matéria orgânica) e os fluxos correspondem ao tipo de produto componente de uma categoria de resíduos transversais a todos as origens (fluxo de embalagens, eletrodomésticos, pilhas, acumuladores, pneus e solventes), (Teixeira, 2007).

Atualmente vigora em Portugal, relativamente aos resíduos, o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, que estabelece a terceira alteração do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, não o revogando, e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008.

Na legislação portuguesa, o termo “resíduos” encontra-se definido como “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer”. As operações de gestão de resíduos compreendem as operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos. Existe uma hierarquia de gestão de resíduos (Figura 1.1), que deve ser respeitada e que pretende incentivar a procura de alternativas que evitem a produção de resíduos, apelando à valorização dos mesmos, preservando os recursos naturais, (Dias, 2012).



Figura 1.1 - Hierarquia de gestão de resíduos, (Formosinho, 2010)

A hierarquia apresenta como principal opção a Prevenção e Redução, seguindo-se a Reutilização, a Reciclagem, outros tipos de valorização (valorização energética ou orgânica) e, apenas em último recurso, quando por qualquer motivo nenhuma outra opção de gestão de resíduos puder ser aplicada, se considera a eliminação, ou seja, a deposição controlada em aterro, (Levy, 2006).

1.1 VALORIZAÇÃO ORGÂNICA EM PORTUGAL

Os dados mais recentes disponíveis no Instituto Nacional de Estatística (INE) referem que em 2012 foi produzido por cada habitante em Portugal 439 kg de resíduos urbanos (RU) por ano sendo que apenas foram encaminhados 61 kg de resíduos por habitante para reciclagem.

Apesar destes valores serem preocupantes tendo em conta o destino final da maioria dos resíduos urbanos, em 2012 produziram-se em Portugal Continental menos 12,5% de RU relativamente a 2010, (Ministério do Ambiente, 2013). Esta redução estará provavelmente relacionada com as dificuldades económicas que se verificaram no país que contribuíram para um decréscimo no consumo e consequentemente uma menor produção de resíduos.

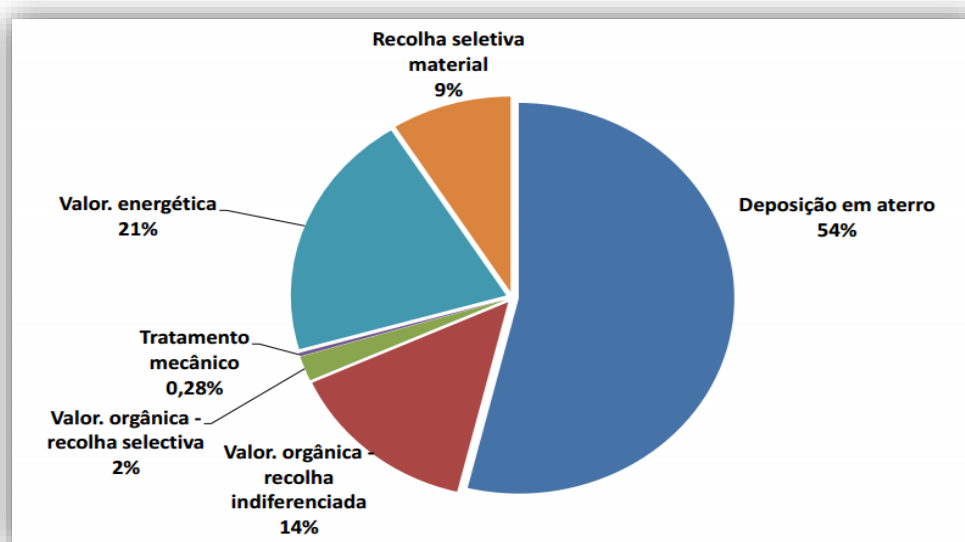


Figura 1.2 - Distribuição dos destinos dos Resíduos Urbanos em Portugal Continental (2012), (Ministério do Ambiente, 2013)

A distribuição dos resíduos em Portugal continua a apresentar para a deposição em aterro uma percentagem bastante significativa e superior às restantes opções de valorização. Como podemos observar na figura 1.2 as percentagens associadas à valorização orgânica são muito reduzidas o que significa que uma grande quantidade dos resíduos biodegradáveis está a ser encaminhado para um destino menos proveitoso.

Tendo em conta este cenário, o principal objetivo relacionado com este setor prende-se com a adoção de medidas e estratégias que visam a redução dos resíduos encaminhados para aterro possibilitando o incremento das estratégias relacionados com a reciclagem e a valorização, (INE, 2012).

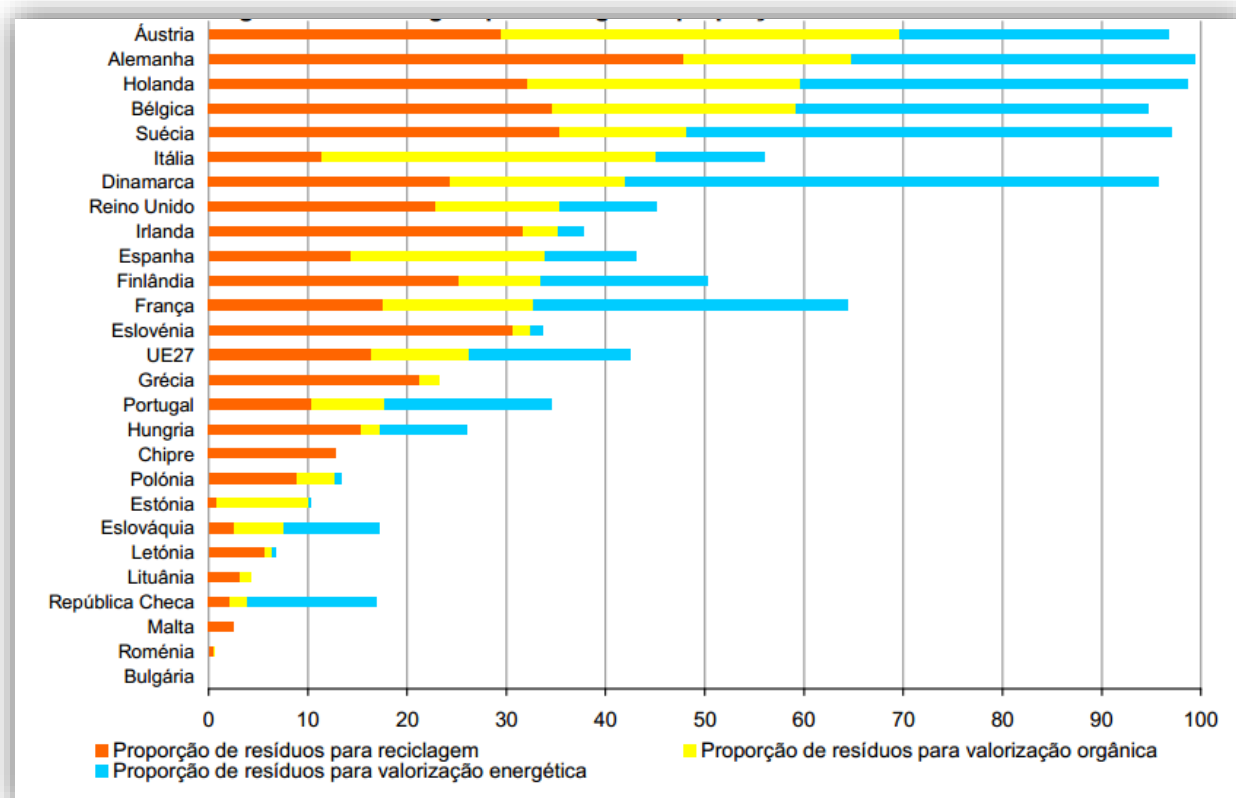


Figura 1.3 - Comparação de resíduos valorizados entre diferentes países, (Ministério do Ambiente, 2013)

Em Portugal as taxas de reciclagem e de valorização orgânica estão a evoluir favoravelmente, aproximando-se de forma gradual da média da União Europeia (UE). Na figura 1.3 estão representadas algumas comparações internacionais relativamente à valorização dos resíduos respeitantes ao ano de 2008, (INE, 2012).

Em 2008, Portugal encontrava-se ligeiramente abaixo dos valores da UE apresentando um total de 35% da totalidade dos resíduos encaminhados para as três opções de valorização referidas sendo que 42% era o valor médio apresentado pela UE. Em termos valorização orgânica, Portugal atingiu os 7% continuando ligeiramente abaixo da média da EU (10%).

Em Portugal, está em discussão o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2020) que visa a aplicação, implementação e monitorização das estratégias propostas até 2020. Estas estratégias aplicam-se aos resíduos urbanos em geral e em relação aos biodegradáveis apresentam as seguintes metas: (Ministério do Ambiente, 2013)

- ✘ Até Julho de 2013: redução para 50 % da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995 para deposição em aterro;
- ✘ Até Julho de 2020: redução para 35% da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995 para deposição em aterro;

Em Portugal existem atualmente 23 Sistemas de Gestão de RU, 12 Multimunicipais e 11 Intermunicipais que são constantemente avaliados segundo o PERSU 2020 de forma a garantir o cumprimento das metas propostas. Na maioria dos sistemas de gestão já existem infraestruturas que permitem reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterro

ficou pendente pela falta de material a adicionar devido à inexistência de relva cedida pelos jardineiros da faculdade. Apesar do projeto ter sido dimensionado para uma alimentação contínua do reator, com recolha diária do composto, nesta fase inicial não foi possível proceder a esse tipo de alimentação devido à inexistência de material em determinados períodos de tempo. Assim sendo, a alimentação foi realizada, em média, uma vez por semana procedendo-se desta forma a uma recolha semanal de composto.

Para remoção do composto assumiu-se que a eficiência da degradação rondava os 80% e que a percentagem biodegradável da relva era de 60%. Durante este trabalho foram instalados termopares e medidores de pH, que tinham sido anteriormente adquiridos. Com o intuito de se analisar o estado de evolução do composto foram retiradas amostras ao longo do tempo em 4 pontos diferentes localizados a diferentes alturas.

Tendo em conta a natureza piloto do projeto procurou-se encontrar a nível nacional e internacional estudos do género, realizados com reatores do tipo vertical com funcionamento em contínuo; no entanto, a pesquisa realizada revelou uma grande escassez a este nível, sendo que apenas foi encontrado um estudo realizado à escala piloto em 2011 na Universidade de Coimbra decorrente de uma dissertação para atribuição de grau Mestre, mas onde o funcionamento do reator não era em contínuo, (Gomes, 2011).

1.3 COMPOSTAGEM

1.3.1 CONCEITOS

Na Portaria nº 15/96 de 23 de janeiro, na alínea i) do nº 3 define-se compostagem como um “processo de reciclagem onde há degradação biológica aeróbia ou anaeróbia de resíduos orgânicos de modo a proceder à sua estabilização, produzindo uma substância húmica, utilizável em algumas circunstâncias como condicionador do solo”.

No entanto, segundo Russo (2003) esta definição não é aceite pela grande maioria dos autores visto que contraria o conceito moderno de compostagem, que é considerado um processo estritamente aeróbio para além de ser bastante redutor em termos de aplicação do composto produzido.

Com o intuito de se desenvolver uma definição o mais característica possível, o conceito de compostagem teve inúmeras modificações à medida que os vários autores aprofundavam os seus estudos relativamente ao processo de compostagem, (Cordeiro, 2010).

Segundo Haug (1993) o processo de compostagem é definido como a "decomposição biológica e estabilização de substratos orgânicos, sob condições que permitam atingir temperaturas termófilas resultantes do calor produzido biologicamente, originando um produto final estável, isento de agentes patogénicos e de sementes e que traz benefícios quando aplicado ao solo."

A definição proposta por Tchobanoglous et al (1993) é bastante semelhante à definição proposta por Haug (1993), no qual descreve a compostagem como um processo onde se dá a biodegradação da matéria orgânica até se atingir um produto estável.

São inúmeras as definições presentes na literatura, sendo umas mais completas do que outras. Por exemplo, Corbitt refere que para além de ocorrer a degradação da matéria orgânica, ocorre ainda a destruição dos agentes patogénicos devido ao calor produzido no processo, (Fernandes, 2012).

A definição proposta por Epstein (1997) refere a compostagem como um processo de decomposição da matéria orgânica segundo condições aeróbicas que pode ser afetada por diversos fatores que graças aos avanços tecnológicos podem ser examinados e manipulados para desenvolver o processo de forma rigorosa.

Na prática, a compostagem é um processo de valorização de resíduos orgânicos, sólidos e semissólidos. Este processo de valorização é desempenhado por microrganismos em condições adequadas, nomeadamente de oxigénio, humidade e nutrientes. Durante a degradação dos resíduos orgânicos verifica-se um aumento da temperatura, associada à libertação de energia pelo processo (exotérmico) que origina um produto estabilizado, denominado de composto, produção de dióxido de Carbono (CO_2), água (H_2O) e libertação de substâncias minerais. Este composto pretende-se que esteja livre de patogénicos de forma a poder ser utilizado em diversas aplicações, (Sousa, 2008).

1.3.2 DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO

Segundo Merkel (1981) no processo de compostagem distinguem-se duas fases principais, a fase ativa (degradação ativa) e a de acabamento (maturação). Estas duas fases encontram-se representadas na figura 1.5.

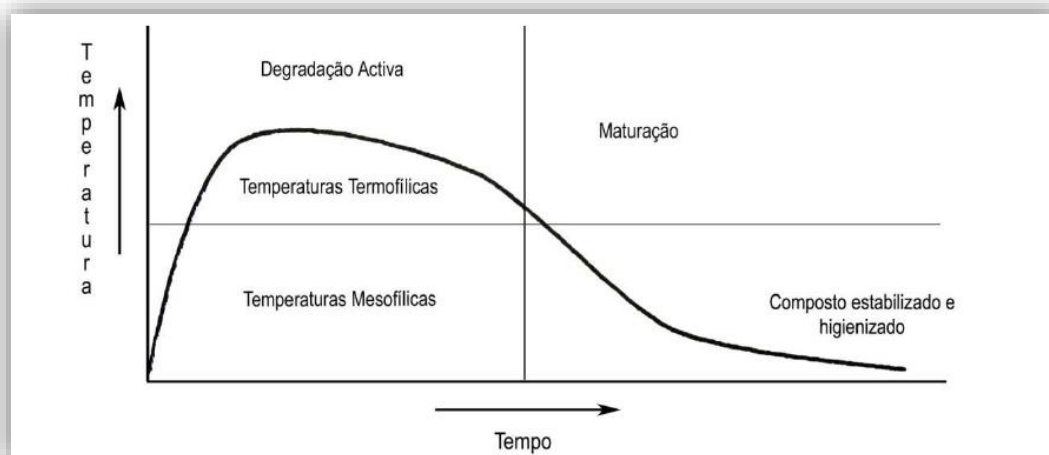


Figura 1.5 - Fases do processo de compostagem em função da temperatura, (Epstein, 1997)

Durante a fase ativa, também chamada de bio estabilização, verifica-se a rápida e intensa bio transformação da matéria orgânica e a existência de temperaturas elevadas resultantes da degradação intensa envolvendo processos exotérmicos. Nesta fase ocorre então a libertação de energia na forma de calor, CO_2 e vapor de água. Durante esta fase verifica-se o

elevado consumo de Oxigênio (O_2) pelos microrganismos e mudanças visíveis na massa de resíduos em compostagem (aspecto escuro e sem odor muito agressivo), (Santos, 2007).

A fase de acabamento, após a fase ativa, é caracterizada por uma progressiva e lenta diminuição da temperatura. Esta é uma fase onde o material presente perde a fitotoxicidade residual e a população microbiana atinge um equilíbrio dinâmico originando a ocorrência da síntese de substâncias húmicas. Durante a maturação, alguns testes simples permitem definir o grau de maturação do composto e portanto a sua possibilidade de utilização, (PROSAB, 1996).

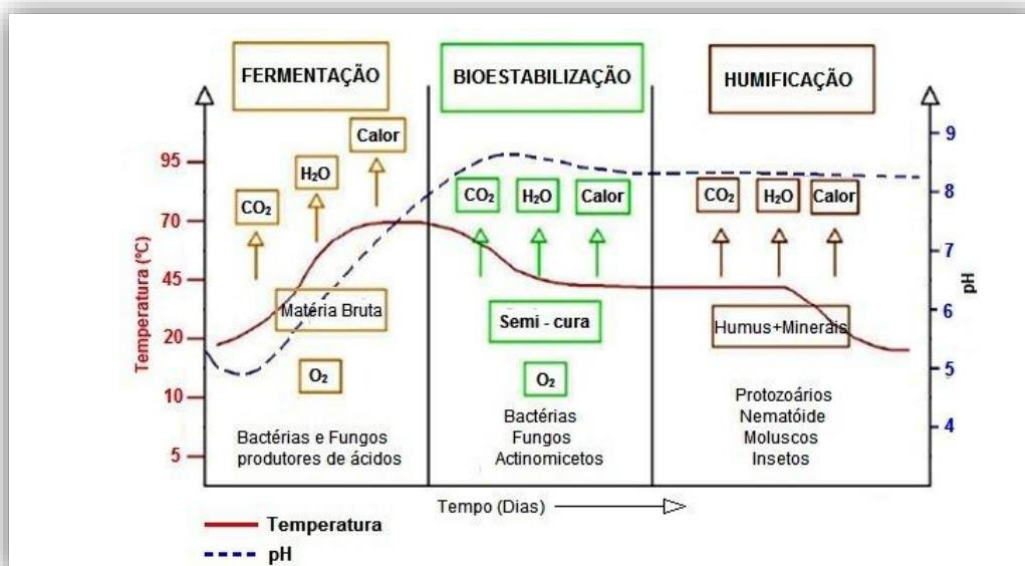


Figura 1.6 - Fases da compostagem, (Júnior, 2012)

Existem autores que consideram a existência de 3 fases: fermentação; fase de semi-cura ou bioestabilização e fase de cura ou humificação. Na primeira fase o pH e a temperatura sofrem um aumento progressivo. Na segunda fase a degradação da matéria orgânica praticamente não sofre evolução e, por fim, na última fase ocorre a humificação do composto seguindo-se de uma estabilização como se pode analisar na figura 1.6, (Júnior, 2012).

Os microrganismos na presença de O_2 e humidade degradam a matéria orgânica, obtendo energia e nutrientes para o seu crescimento e reprodução. Inicialmente ocorre a degradação das substâncias mais simples seguindo-se as mais complexas. Os organismos, durante o processo, produzem dióxido de carbono, água, calor, subprodutos gasosos e o composto final sendo que alguma da energia produzida é utilizada em seu próprio benefício, (Coucello, 2007). Na figura 1.7 encontra-se uma representação simplificada do processo anteriormente descrito.

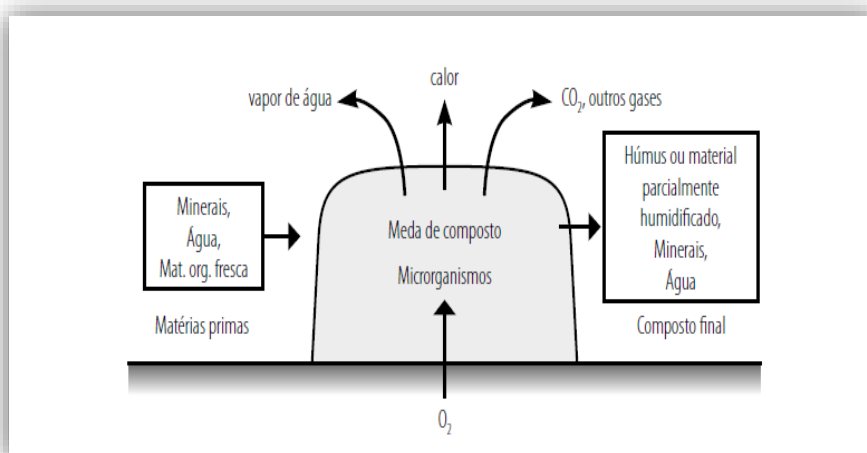


Figura 1.7 - Esquema geral do processo de compostagem, (Batista J. & Batista E., 2007).

No início do processo de compostagem verifica-se a proliferação de diversos e complexos grupos de microrganismos como por exemplo, bactérias, fungos e actinomicetes de acordo com as condições do meio. A classificação destes grupos baseia-se nas suas temperaturas ótimas, sendo que estes microrganismos podem ser classificados em psicrófilos (0 – 20 °C), mesófilos (15 – 43 °C) e termófilos (40 - 85 °C), (PROSAB, 1996).

É importante referir que estes intervalos não são delimitados por limites rígidos sendo apenas os intervalos ótimos para a proliferação de determinado grupo. Na Figura 1.8 encontra-se um resumo esquemático dos intervalos de temperatura suportados pelos vários tipos de microrganismos.

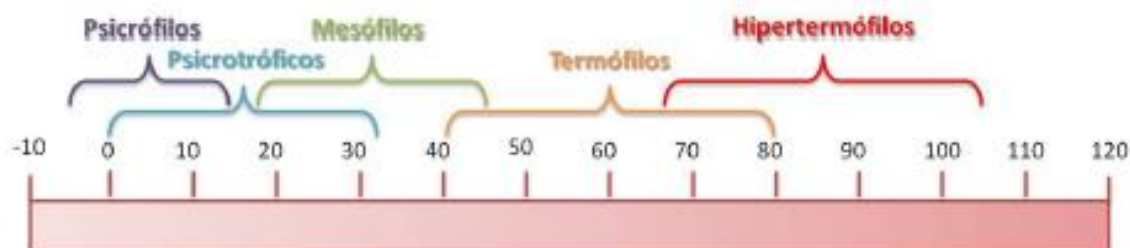


Figura 1.8 - Intervalos de temperatura suportados pelos vários tipos de microrganismos, (Júnior, 2012).

No início do processo de degradação (fase ativa) verifica-se uma fase de latência que corresponde à colonização da matéria orgânica pelos organismos. Durante esta fase ocorre um elevado crescimento de microrganismos mesófilos (principalmente bactérias e fungos) o que provoca o aumento exponencial da temperatura da biomassa devido à libertação de energia, na forma de calor, produzida pelos microrganismos mesófilos, dando lugar ao aparecimento de microrganismos termófilos, (Santos, 2007).

O aumento da temperatura resultante da degradação da matéria orgânica pelos microrganismos mesófilos provoca a proliferação dos microrganismos termófilos que se adaptam melhor às temperaturas mais elevadas reduzindo a população mesófila, (PROSAB, 1996).

As populações termófilas decompõem muito rapidamente a matéria orgânica e conduzem a uma estabilização e higienização eficiente dos materiais provocando a eliminação dos agentes patogénicos existentes, (Santos, 2007).

À medida que as fontes de energia começam a ser menores, ocorre a redução da atividade biológica e como tal a redução da temperatura permitindo que os microrganismos mesófilos se instalem novamente. Nesta fase verifica-se que a maioria das moléculas mais simples se encontram transformadas e que já se iniciou o estado de humificação verificando-se que o composto apresenta odor agradável, (PROSAB, 1996).

Um dos principais desafios da compostagem é a retenção de azoto no composto final. Pretende-se obter uma redução do material utilizado para compostagem entre 20 e 60 % do seu volume, 40 % do seu teor de humidade e até 50 % do seu peso. No final, o composto resultante deve assumir características muito semelhantes ao húmus, a fração orgânica do solo, (Fernandes, 2012).

1.3.3 ETAPAS DO PROCESSO

Cunha - Queda (1991) refere que no processo de compostagem distinguem-se 3 etapas importantes para o funcionamento correto do mesmo: condicionamento dos materiais, o processo de compostagem e afinamento do composto.

CONDICIONAMENTO DOS MATERIAIS

Esta etapa corresponde a um pré-processamento dos materiais que serão utilizados para a compostagem. Procede-se à separação da fração orgânica dos restantes materiais, redução da granulometria para obter dimensões mais adequadas ao arejamento e ao ataque dos microrganismos. Nesta fase também se pode proceder à adaptação da mistura. Este ajuste pode ser realizado através da mistura de agentes de suporte para garantir uma boa estrutura ou através de agentes condicionantes que têm por função fornecer o carbono ou o azoto, ou ainda serem corrigidos os teores de humidade, (Cunha - Queda, 1991).

PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Esta etapa corresponde à compostagem propriamente dita, ou seja corresponde ao processo de decomposição aeróbia da fração orgânica dos resíduos selecionados por ação de diversos microrganismos. Nesta etapa o material pode ser revolvido periodicamente ou receber ar insuflado por arejadores. A atividade metabólica afeta a composição química dos resíduos selecionados provocando a redução do volume e peso do resíduo, (Santos, 2007).

AFINAMENTO DO COMPOSTO

Esta etapa corresponde a um pós-processamento mecânico com o objetivo de melhorar as características do composto. Nesta etapa procede-se ainda à remoção de inertes que não foram removidos na etapa de pré-processamento, (Cordeiro, 2010).

1.4 TECNOLOGIAS DE COMPOSTAGEM

A compostagem é um processo biológico de tratamento de resíduos que na sua forma mais básica, apenas necessita de microrganismos e oxigénio para ocorrer. A introdução de tecnologias visa essencialmente à regulamentação e controlo do processo de forma a produzir compostos de melhor qualidade, a uma maior velocidade de reação, (Mendes, 2009).

A necessidade de regulamentar e controlar o processo leva autores como Cunha - Queda (1999) a defenderem que a compostagem não pode ser espontânea visto que neste processo devem-se controlar os fatores de forma a garantir um produto final higienizado e de constante e elevada qualidade.

Uma particularidade interessante deste processo é permitir a obtenção de um composto de boa qualidade quer por tecnologias simples quer por tecnologias mais complexas desde que os resíduos sejam adequados e o processo ocorra de acordo com as condições necessárias, (PROSAB, 1996).

As tecnologias ou sistemas de compostagem são bastante diversificados, podendo variar de sistemas muito básicos e manuais até sistemas com um grande grau de complexidade onde se efetua a monitorização e controlo dos parâmetros do processo com elevada precisão (PROSAB).

Segundo Tchobanoglous et al (1993) a classificação dos sistemas de compostagem pode-se dividir em três grupos distintos: Sistema de leiras revolvidas (windrow); Sistema de leiras estáticas arejadas (static pile) e Sistemas fechados ou reatores biológicos (In-vessel).

1.4.1 SISTEMA DE LEIRAS REVOLVIDAS

A aplicabilidade deste sistema de compostagem está dependente das condições do solo onde o projeto será implementado, nomeadamente a topografia, o sistema de drenagem, entre outras características específicas, (Ventura, 2009).

Neste método, a mistura dos resíduos é disposta em leiras e o arejamento é conseguida devido ao revolvimento dos resíduos por equipamentos mecânicos e à convecção e difusão do ar presente na massa do composto. Uma variante deste sistema consiste na insuflação de ar sob pressão nas leiras para garantir o arejamento, (PROSAB, 1996).

Durante o revolvimento a matéria orgânica entra em contacto com a atmosfera (rica em oxigénio) suprimindo momentaneamente as necessidades do resíduo. Este efeito de revolvimento é limitado por diversos fatores como a porosidade, nutrientes e humidade, (Ventura, 2009).

O revolvimento permite para além do arejamento dos resíduos, a própria mistura do material, a manutenção de uma porosidade adequada e a libertação de calor e de vapor de água (permitindo o controlo da temperatura). Para alcançar uma decomposição uniforme da matéria orgânica e eliminação dos patogénicos o revolvimento deve ser efetuado dos extremos para o centro da pilha, (Mendes, 2009).

A configuração e dimensão das leiras depende do resíduo estruturante, no entanto, as mais comuns são as leiras triangulares cujas dimensões variam entre com 1,5 a 1,8 m de altura e 4,0 a 4,5 m de base. Esta configuração apresenta resultados provados, no entanto diferentes dimensões podem ser adotadas, (PROSAB, 1996).

Este processo de compostagem demora normalmente 2-4 dias para atingir os 60 °C e necessita de 1 a 2 meses para a fase termófila terminar o seu ciclo. Durante a manutenção as necessidades de arejamento são menores e o revolvimento é suficiente se for realizado a cada 20-25 dias. A fase de maturação dura normalmente entre 2 e 3 meses e no fim o composto pode ser peneirado e ensacado, ou então vendido a granel, (PROSAB, 1996).

A emissão de odores é uma consequência da adoção deste processo; no entanto, após 5-6 dias do início do processo o odor praticamente deixa de se fazer sentir. Como a emissão é mais intensa no momento do revolvimento existem medidas que podem ser adotadas para minimizar este efeito, (Mendes, 2009). Na figura 1.9 encontra-se a representação de um sistema de leiras revolvidas.

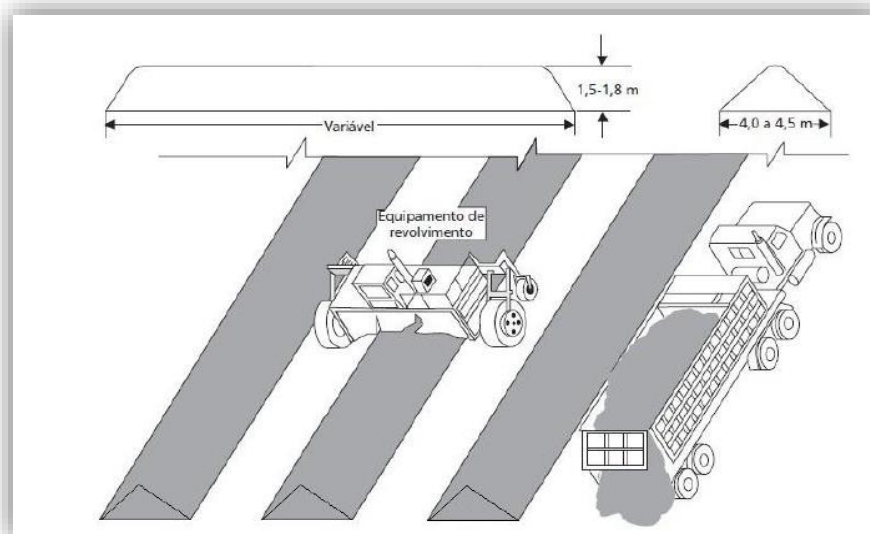


Figura 1.9 - Sistema de leiras revolvidas, (Júnior, 2012).

1.4.2 SISTEMA DE LEIRAS ESTÁTICAS AREJADAS

Este sistema de compostagem foi iniciado nos anos setenta com o propósito de realizar o tratamento dos biossólidos nas instalações de tratamento de águas residuais e tem atualmente os EUA como o seu maior utilizador, (Coelho, 2007).

Nas leiras estáticas arejadas o arejamento é forçado por ventilação ou sucção realizados por ventiladores sem recorrerem a agitação ou revolvimento. A este sistema está normalmente acoplado um filtro biológico com o intuito de evitar a propagação de odores transportados pelo ar que flui pela leira, (Ventura, 2009).

Estas pilhas são construídas em cima de uma estrutura de difusão de ar, constituída por diversos tipos de materiais como plástico perfurados, cones de arejamento ou por perfurações no pavimento. A disposição dos resíduos a compostar deve no entanto seguir uma determinada ordem, sendo que o material deve ser colocado sobre uma camada porosa, como composto final ou pedaços de madeira, aplicando-se no final uma camada no topo da pilha que forneça isolamento, (Coelho, 2007).

Neste processo, pode-se adotar uma ventilação contínua ou com intervalo de tempo atendendo à evolução do processo. Este tipo de arejamento fornece o oxigénio necessário, arrefece a pilha e permite ainda a eliminação do vapor de água, dióxido de carbono entre outros produtos associados à decomposição, (Mendes, 2009).

Alguns autores defendem a existência de um sistema intermédio entre as leiras estáticas e as leiras estáticas com arejamento forçado, no qual o material a compostar assenta sobre uma estrutura permeada (tubos abertos nas duas extremidades) que permitem fazer uma ventilação passiva sem recorrerem a revolvimentos, (Ventura, 2009).

Estes sistemas, no entanto, implicam um cuidadoso dimensionamento do sistema de difusão do ar, visto que uma difusão não eficiente pode criar curtos circuitos de ar que provocam redução da humidade e como tal a diminuição da atividade microbiana, (Mendes, 2009). Na figura 1.10 encontra-se uma representação típica de um sistema de leiras estáticas arejadas.

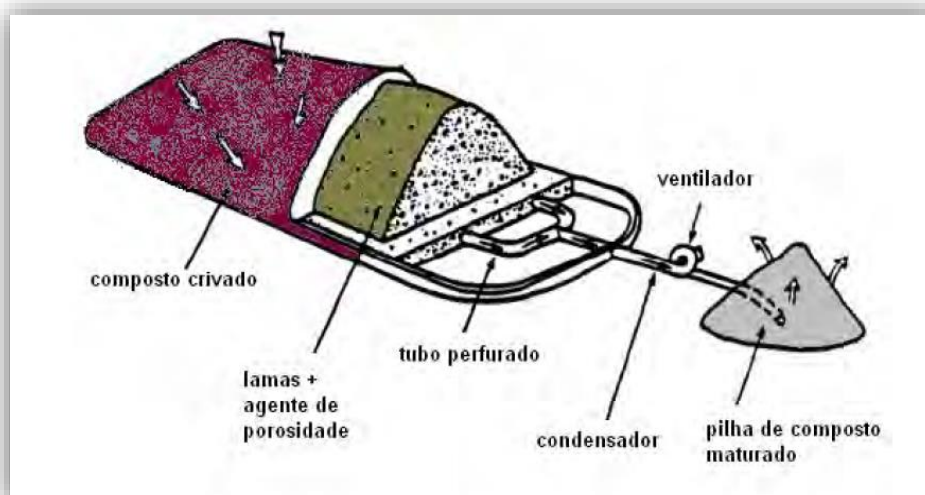


Figura 1.10 - Sistema de leiras estáticas com arejamento por sucção, (Ventura, 2009).

1.4.3 SISTEMAS FECHADOS OU REATORES BIOLÓGICOS (IN-VESSEL)

A classificação dos sistemas fechados aparece na literatura de forma bastante distinta dependendo dos autores mencionados. Segundo Epstein (1997), a classificação destes sistemas deve basear-se na sua orientação, e como tal dividem os sistemas fechados em três grupos distintos, “vertical”, “horizontal” e “inclinado”.

Por outro lado, Shammass, N. K. & Wang (2008), L. K. preferem a classificação com base na forma geométrica, separando os sistemas cilíndricos, retangulares, em túnel e em contentor. Autores como Krogmann, U. & Körner, I (2008), subdividem os sistemas fechados em sistemas com e sem reator separando os casos em que a compostagem apesar de ser realizada dentro de pavilhões não é realizada dentro de reatores.

Os sistemas em reator operam em sistema fechado e são desenhados de forma a otimizar o processo de compostagem, incluindo a mistura mecânica e automática do composto, sob condições controladas permitindo a opção de arejamento forçado, (Mendes, 2009).

A compostagem realizada em reatores biológicos (In-Vessel) conduz a um maior controlo dos parâmetros importantes para o processo de compostagem, nomeadamente a temperatura, humidade e grau de oxigenação. Neste tipo de reatores, a fase termófila é mais reduzida o que conferiu à compostagem em reator, a denominação de “compostagem acelerada”, (PROSAB, 1996).

Este tipo de sistema conseguiu originar inúmeras patentes de reatores, sendo que os mais conhecidos são os reatores verticais, horizontais e tambores rotativos, (Ventura, 2009).

1.4.3.1 REATORES VERTICAIS

Os reatores verticais (figura 1.11) são do tipo silo e tem normalmente uma altura superior a 4 metros. Neste tipo de reatores, a introdução de resíduos é efetuada pelo topo e recolhido no fundo do reator. O deslocamento do material realiza-se por gravidade e a insuflação do ar é realizado em contra, (Ventura, 2009).

Este sistema é um sistema de compostagem rápido que implica uma longa etapa de maturação. Os gases recolhidos devem ser encaminhados para um sistema de tratamento de odores, (Mendes, 2009).

Devido à altura elevada do silo, a temperatura e a concentração de O_2 são parâmetros difíceis de controlar devido à criação de gradientes apreciáveis ao longo do reator. Uma medida para minimizar estes problemas é a alteração do sentido de introdução do ar, bem como a incorporação deste lateralmente, (Ventura, 2009).

Estes reatores verticais são maioritariamente utilizados para o tratamento de lamas em ETAR's, sendo que a sua utilização para o tratamento de Resíduos sólidos Urbanos ainda é pouco significativa, (Ventura, 2009).



Figura 1.11 - Reator vertical descendente, (Ventura, 2009)

1.4.3.2 REATORES HORIZONTAIS

Este sistema (figura 1.12) também é designado por sistema em canal, sendo que o material a compostar é disposto em vários canais longos e estreitos e o material compostado é revirado por um sistema automático apoiado em carris, (Mendes, 2009).

A altura de resíduos varia entre 2 e 4 metros originando gradientes de temperatura de oxigénio menores do que nos reatores verticais. O fluxo de ar pode ser garantido por um sistema de difusores instalados nas laterais e na base dos canais, (Ventura, 2009).

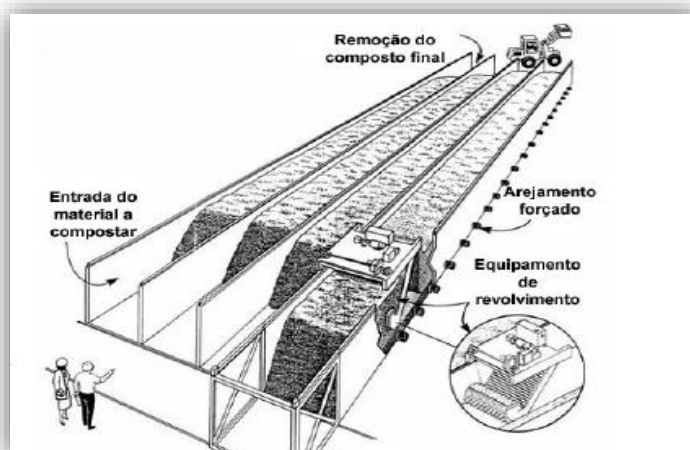


Figura 1.12 - Reator horizontal ou em canal, (Mendes, 2009)

1.4.3.3 TAMBORES ROTATIVOS

No sistema de tambor rotativo, a introdução dos resíduos é realizada numa das extremidades do tambor que tem uma certa inclinação. Esta inclinação permite que o material se desloque por gravidade para a direção oposta através de uma rotação lenta, (Mendes, 2009).

Os tambores rotativos tem uma dimensão que varia entre 2-4 metros de diâmetro podendo atingir os 45 metros de comprimento, rodando entre 0,5 e 2 rpm. A rotação permite uma maior homogeneização e trituração dos resíduos, diminuindo a formação de acentuados gradientes de temperatura, (Ventura, 2009).

1.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS - TECNOLOGIAS

As tecnologias de compostagem podem ser analisadas com base nas suas vantagens e desvantagens que permitem concluir quanto à sua aplicabilidade em diversas situações. À escala industrial, as pilhas estáticas, com ou sem sistema poroso de arejamento passivo, não são frequentemente utilizadas, devido aos longos períodos necessários ao processo e ao reduzido controlo dos parâmetros que afetam a compostagem, (Mendes, 2009).

1.5.1 SISTEMA DE LEIRAS REVOLVIDAS

VANTAGENS:

- ✗ Facilmente adaptável a qualquer tipo de exploração;
- ✗ Investimento inicial moderado;
- ✗ Requer equipamentos simples e a operação do processo não é complexa;
- ✗ Capacidade para processar grandes quantidades de matéria quando localizada numa grande área;
- ✗ Revolvimentos frequentes permitem controlar a porosidade e o arejamento das pilhas, contribuindo para uma maior secagem e separação de materiais;
- ✗ Produção de composto homogêneo e de boa qualidade, bastante superior ao das pilhas estáticas;

DESVANTAGENS:

- ✗ Requerem áreas elevadas devido à necessidade de existir espaço entre as leiras para o revolvimento;
- ✗ Dificuldade de controlo do odor, principalmente na fase do revolvimento;
- ✗ A produção em terreno aberto torna as pilhas sensíveis às condições atmosféricas (temperatura, humidade e chuvas);
- ✗ Necessidade de revolvimento frequente, principalmente nas etapas iniciais, de forma a se manterem boas condições de porosidade e de temperatura;
- ✗ Exigência de grande labor humano e de utilização dos equipamentos mecânicos para o revolvimento;

- ✗ Impossibilidade de fazer revolvimento em tempo de chuva se não existir cobertura do pátio de compostagem;
- ✗ Custos assinaláveis a médio prazo resultantes do uso e desgaste dos equipamentos;

1.5.2 SISTEMA DE LEIRAS ESTÁTICAS AREJADAS

VANTAGENS:

- ✗ Investimento inicial moderado;
- ✗ As leiras podem ser maiores do que as leiras revolvidas uma vez que, ao contrário destas, o arejamento é forçado;
- ✗ Não é necessário espaço para o equipamento de viragem nem entre pilhas;
- ✗ O aumento no arejamento encurta o tempo de duração da compostagem;
- ✗ O controlo dos ventiladores, por tempo de funcionamento ou temperatura da pilha, permite controlar as variações de diversos parâmetros contribuindo para um composto mais consistente;
- ✗ A elevada temperatura atingida aumenta a eliminação de agentes patogénicos;
- ✗ Requer um menor investimento de capital quando comparado com as operações do sistema em reator (também requer a utilização de arejamento forçado);
- ✗ Melhor controlo dos odores associados ao processo;

DESVANTAGENS:

- ✗ Quando a mistura é realizada de forma incorreta, no que se refere à porosidade e à estruturação da pilha, podem criar-se “curto-circuitos” de ar que implicarão uma desigual compostagem da pilha e naturalmente originam a produção de um composto de menor qualidade;
- ✗ Os orifícios dos tubos de arejamento podem ficar obstruídos, impedindo assim o correto arejamento de toda a pilha. Como as perfurações se encontram na base da leira, este problema é de difícil resolução;
- ✗ A instalação, remoção e os danos provocados nos tubos de arejamento durante a formação das pilhas podem constituir um problema;
- ✗ Necessidade de investimento elevado para a instalação do sistema de arejamento;
- ✗ O arejamento forçado tende a secar a pilha de composto sendo necessário um maior controlo da humidade;

1.5.3 SISTEMAS FECHADOS OU REATORES BIOLÓGICOS (IN-VESSEL)

VANTAGENS:

- ✗ O facto de o processo se desenvolver em sistema fechado anula os efeitos negativos das condições atmosféricas permitindo o controlo da qualidade e consistência do produto final;
- ✗ Reduz o potencial de problemas relacionados com os odores através da diluição do ar interior com ar proveniente do exterior ou por aplicação de um sistema de tratamento desses odores;
- ✗ Permitem uma menor demanda de área que juntamente com uma gestão eficiente do espaço, possibilita a preparação de pilhas com uma altura superior quando comparadas com as pilhas revolvidas;
- ✗ Implicam menor intervenção humana uma vez que o processo de revolvimento da leira é automatizado;
- ✗ Dependendo do sistema adotado existe a possibilidade de recuperação de energia térmica;

DESVANTAGENS

- ✗ Custos elevados de investimento, operação e manutenção associados ao equipamento automático de revolvimento do material;
- ✗ A estabilização do produto final pode não ser tão eficiente tendo em conta o reduzido período de tempo em que se desenvolve a compostagem, implicando desta forma um tempo maior de maturação;
- ✗ Sistema com pouca flexibilidade no que diz respeito à localização e ao equipamento utilizado;
- ✗ Menor flexibilidade para tratar diferentes volumes de resíduos;
- ✗ Dependência de sistemas mecânicos;
- ✗ Produto final extremamente dependente das tecnologias adotadas;

1.6 RESUMO DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE COMPOSTAGEM

Na tabela 1.2 estão compiladas as características principais de diferentes sistemas de compostagem. Nesta análise, destacam-se os custos associados à implementação das técnicas e as diversas necessidades associadas como controlo de odores e o controlo do arejamento.

Tabela 1.2 - Sumário dos principais sistemas de compostagem, adaptado de Tchobanoglous et al (1993)

			REATOR BIOLÓGICO, AREJAMENTO FORÇADO	
CATEGORIA	SISTEMA DE LEIRAS REVOLVIDAS	SISTEMA DE LEIRAS ESTÁTICAS AREJADAS	COM AGITAÇÃO (DINÂMICO)	SEM AGITAÇÃO (ESCOAMENTO PISTÃO)
CUSTOS DE CAPITAL	Geralmente baixos	Geralmente baixo em sistemas de pequena dimensão	Geralmente altos	Geralmente altos
CUSTOS DE OPERAÇÃO	Geralmente baixos	Elevado (aquando da adição de grandes volumes de matéria)	Geralmente baixos	Geralmente baixos
ÁREA NECESSÁRIA	Elevada	Elevada	Baixa mas pode ser elevada quando são necessárias leiras para maturação	Baixa mas pode ser elevada quando são necessárias leiras para maturação
CONTROLO DO AREJAMENTO	Limitado	Completo	Completo	Completo
CONTROLO OPERACIONAL	Revolvimento frequente, controlo e adição de resíduos	Caudal de ar introduzido	Caudal de ar introduzido, controlo e adição de resíduos	Caudal de ar introduzido, controlo e adição de resíduos
SENSIBILIDADE ÀS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS	Sensível exceto quando se utiliza cobertura	Resultados obtidos em climas quentes e frios	Resultados obtidos em climas quentes e frios	Resultados obtidos em climas quentes e frios
CONTROLO DE ADORES	Dependente da matéria-prima, grande área a produzir odores	Grande área a produzir odores mas podem ser controlados	Potencialmente eficaz	Potencialmente eficaz
POTENCIAIS PROBLEMAS OPERACIONAIS	Possibilidade de ser afetado pelas condições atmosféricas	Controlo de caudal de ar é um fator crítico	Elevada flexibilidade operacional; sistema complexo	Sistema complexo do ponto de vista mecânico

1.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS - COMPOSTAGEM

São inúmeras as vantagens que se podem atribuir à compostagem e ao próprio composto resultante do processo; no entanto, também há algumas desvantagens. As principais vantagens do processo de compostagem como tecnologia do tratamento de biomassa são (Cordeiro, 2010; Russo, 2003):

- ✗ Redução do volume, da massa e do teor de humidade dos resíduos tratados;
- ✗ Estabilização química e biológica dos materiais putrescíveis;
- ✗ Obtenção de produtos – compostos – com interesse agrícola;
- ✗ Rápida decomposição microbiana e oxidação da matéria orgânica tornando-a estável com mínima produção de odores;
- ✗ Higienização do material devido às reações exotérmicas de decomposição;
- ✗ A maior parte dos sistemas usam pouca quantidade de energia externa para funcionar, comparando com outros sistemas de tratamento;
- ✗ Produção de fertilizantes naturais não contaminantes das águas subterrâneas ou superficiais, como acontece com os fertilizantes minerais (químicos, que lixiviam);
- ✗ Grande flexibilidade em escala de operação;
- ✗ Tratamento menos caro que os outros tipos de tratamento, quando se entra em consideração com os ganhos ambientais resultantes;
- ✗ Diversos trabalhos demonstram que a compostagem é um processo que proporciona uma boa destruição dos microrganismos patogénicos e estabilização da matéria orgânica;

A nível da utilização dos compostos também se podem identificar algumas vantagens, nomeadamente:

- ✗ O facto de os compostos produzidos serem uma fonte de matéria orgânica para manutenção ou incremento do húmus do solo, necessário para uma melhor estrutura do mesmo e aumento da capacidade de retenção de água, (Haug, 1993);
- ✗ A sua utilização permite o aumento da produção das culturas em sistemas intensivos ou em explorações agrícolas familiares, (Haug, 1993);
- ✗ Possibilita a reutilização de nutrientes (como por exemplo o azoto, o fósforo, o potássio, microelementos);

Estas vantagens só se conseguem atingir se se efetuar uma escolha criteriosa em termos de tecnologia, projeto e operação. Se isso não acontecer, muitas das vantagens podem não ser atingidas, culminando num produto de menor qualidade, (Russo, 2003)

A nível de desvantagens ou condições menos favoráveis destacam-se os seguintes tópicos (Cordeiro, 2010):

- ✗ Necessidade de maior área de terreno disponível do que no caso de outros processos de tratamento;
- ✗ Necessidade de realizar uma prévia triagem do material para que não estejam presentes produtos de decomposição lenta e que contenham metais pesados;
- ✗ Monitorização cuidada ao longo do processo para que não ocorram a formação de maus cheiros nem perda excessiva de humidade do material;
- ✗ Exigência de mais trabalho e consequentemente de mais mão-de-obra, o que pode traduzir-se em último caso até numa vantagem parcial já que a mão-de-obra pode ser pouco especializada tendo assim um impacto social positivo;

1.8 CONTROLO DO PROCESSO

No processo de compostagem ocorre a degradação da matéria orgânica pela ação de microrganismos diversificados. Assim sendo, os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são os que afetam, direta ou indiretamente a atividade metabólica destes microrganismos, (Tchobanoglous et al, 1993).

Desta forma, os fatores que afetam o processo são os que interferem na existência de uma diversificada população de microrganismos, oxigénio para suprir a demanda biológica, a temperatura que afeta velocidade das reações bioquímicas e a água (expressa em termos de humidade), (Russo, 2003). Na Figura 1.13 é possível observar um diagrama com os principais fatores que afetam a decomposição dos substratos durante a compostagem:

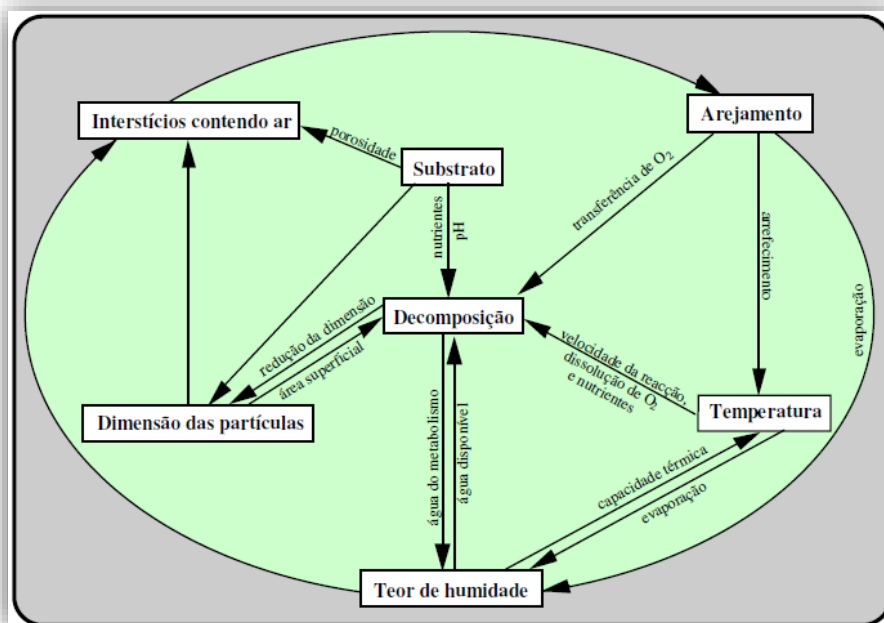


Figura 1.13 - Diagrama dos principais fatores que afetam a decomposição dos substratos, (Cordeiro, 2010).

Existem no entanto outros parâmetros a considerar, nomeadamente os nutrientes necessários para a sobrevivência e crescimento dos microrganismos, expressos pela relação C/N. Um outro fator bastante importante que pode afetar a

ordem operacional do processo é a granulometria (tamanho das partículas) que influencia o arejamento e a estabilidade geométrica das pilhas ou leiras, (Russo, 2003).

O controlo e a otimização dos parâmetros operacionais tem, assim, como principal objetivo atingir as condições ótimas de processamento que possibilitem aos microrganismos atingirem o máximo de degradação possível da matéria orgânica (Santos, 2007).

1.8.1 MICROORGANISMOS

O ecossistema do processo de compostagem, processo maioritariamente biológico, é muito variado e conta com a presença de diversos microrganismos, (Fernandes, 2012).

No processo de compostagem verifica-se a presença de uma grande biodiversidade de microrganismos. Estes seres vivos podem ser divididos em três grupos distintos: bactérias, fungos e actino bactérias. Estes microrganismos são os responsáveis pela degradação do material presente nas pilhas ou reatores, (Tchobanoglous et al, 1993).

Como já foi referido anteriormente, ao longo do processo de compostagem é possível identificar a variação do tipo de microrganismos presentes. Na fase mesófila verifica-se a presença de bactérias produtoras de ácido que metabolizam os lípidos, os açúcares e as proteínas e na fase termófila, as bactérias termófilas tornam-se ativas e continuam a metabolização das proteínas, lípidos e gorduras presentes e são responsáveis pela energia produzida e libertada em forma de calor. Encontram-se ainda presentes em ambas as fases, os actinomicetes e os fungos que são responsáveis pela degradação de compostos orgânicos complexos e da celulose, (Epstein, 1997).

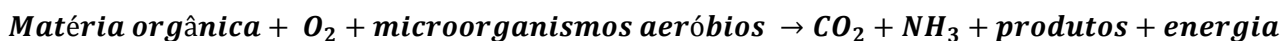
1.8.2 OXIGÉNIO E AREJAMENTO

Tendo em conta a natureza aeróbia do processo, a presença de oxigénio revela-se essencial para a atividade microbiológica. Os microrganismos necessitam da presença de O_2 para degradar a matéria orgânica que usam como suporte alimentar, sendo que a limitação deste parâmetro pode provocar o prolongamento do ciclo de compostagem ou permitir a proliferação de microrganismos anaeróbios que provocam a libertação de maus odores, (PROSAB, 1996).

No entanto, a função do arejamento não é apenas garantir as condições aeróbias da pilha mas também promover o controlo da temperatura (principalmente por evaporação da água), remover o vapor de água para permitir a secagem do material, a remoção dos gases resultantes da decomposição (CO_2 , NH_3 , etc.) do interior da massa de compostagem, e evitar a compactação do substrato, (Coucello, 2007).

O sistema de arejamento varia de acordo com os diferentes métodos e sistemas aplicados; no entanto, os métodos mais utilizados para o fornecimento de oxigénio durante a compostagem são o revolvimento mecânico da pilha, o fluxo de ar por convecção e o arejamento mecânico, (Epstein, 1997).

As necessidades de oxigénio podem ser calculadas com base na seguinte relação (Batista J. & Batista E., 2007):



A concentração de oxigênio no interior do substrato deve-se manter acima de 5% e menor do que 15% para evitar as perdas de calor. As necessidades de oxigênio estequiométrico variam entre 1,0 gO₂/gSV para resíduos altamente oxigenados, tais como a celulose, até 4,0 gO₂/gSV para hidratos de carbono saturados (Haug, 1980).

É importante fornecer um excesso de ar relativamente às necessidades estequiométricas de forma a garantir a difusão deste até aos espaços vazios no interior das partículas, (Felícia, 2009). A figura 1.14 apresenta a curva teórica das necessidades de oxigênio, expressas em volume de oxigênio por matéria seca de substrato, ao longo de um processo de compostagem.

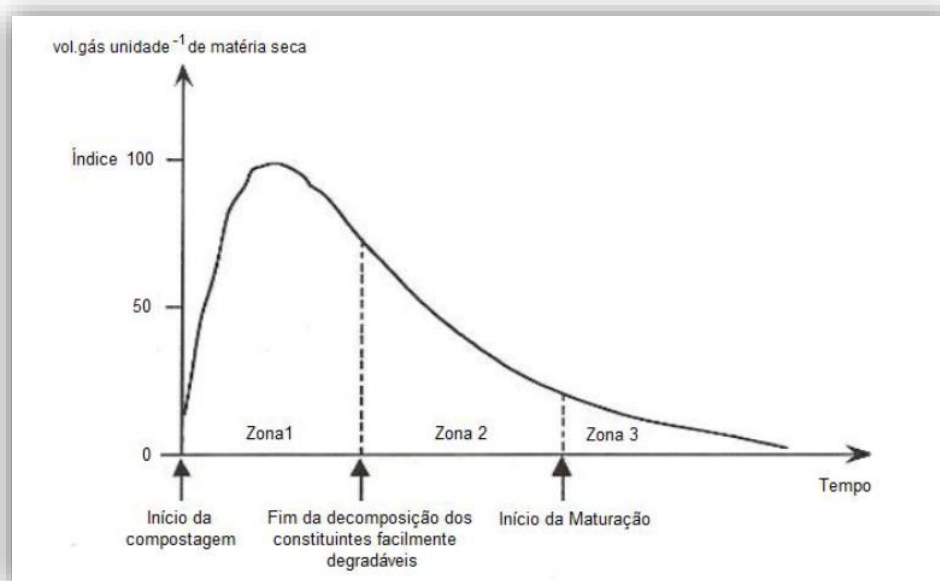


Figura 1.14 - Curva teórica das necessidades de oxigênio ao longo de um processo de compostagem, (Júnior, 2012).

1.8.3 TEMPERATURA

A temperatura é considerada por muitos autores o parâmetro principal num processo de compostagem. Se os restantes parâmetros tiverem dentro dos valores ótimos, um aumento da temperatura é proporcional à existência de atividade microbiana e é indicativo, indiretamente, do grau de estabilização/maturação da matéria orgânica, (Coelho, 2007).

Os microrganismos utilizam a matéria orgânica disponível (fonte de energia e nutrientes) para as suas atividades. Durante este consumo, parte da energia é utilizada para as atividades dos microrganismos enquanto que uma outra parte se liberta sobre a forma de calor. Este calor fica retido no seio do material a compostar provocando um aumento da temperatura, (Cunha - Queda, 1999).

A temperatura torna-se um fator importante interferindo não só ao nível da velocidade de degradação da matéria orgânica mas também na qualidade do produto final, que tendo em conta as suas possíveis utilizações deve estar isento de risco para a saúde pública. Em média, a velocidade das reações bioquímicas duplica por cada 10°C de

aumento de temperatura e as elevadas temperaturas atingidas permitem eliminar organismos patogénicos eventualmente presentes (bactérias, fungos, esporos, larvas e ovos de insetos) que não devem existir no composto produzido, (Sousa, 2007).

A produção de calor está dependente da velocidade a que os microrganismos decompõem a matéria orgânica e esta, por sua vez, é influenciada pela humidade, arejamento, relação C/N, granulometria e disposição dos materiais e da temperatura externa à pilha ou reator.

Tchobanoglous et al (1993) defendem uma gama de temperaturas que varia entre 50 e 55 °C para os primeiros dias de decomposição seguindo-se uma gama um pouco mais alta entre 55 e 60 °C para os restantes dias. Segundo os mesmos autores, temperaturas superiores a 65 °C provocam uma diminuição significativa da atividade biológica.

A temperatura superior a 65 °C, os microrganismos entram num estado de dormência que provoca a diminuição da atividade microbiana e consequentemente a eficiência e rapidez da degradação. Apenas sobrevivem os organismos produtores de esporos devido a esta capacidade de inibição da atividade sendo que os restantes acabam por morrer, (Fernandes, 2012).

A comunidade de microrganismos que realiza a degradação da matéria orgânica também é alterada consoante as diferentes temperaturas atingidas. Na figura 1.15 é possível verificar a variação da temperatura durante um processo típico de compostagem e os microrganismos que caracterizam essa variação.

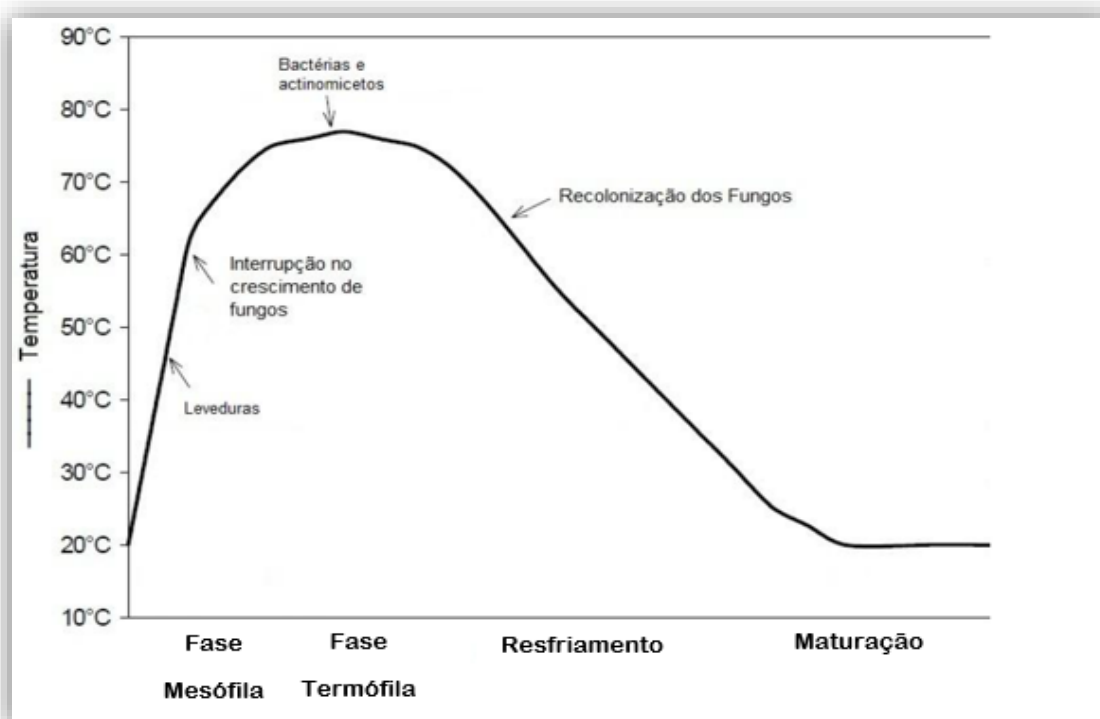


Figura 1.15 - Variação da temperatura durante o processo de compostagem orgânica, (Júnior, 2012).

1.8.4 TEOR DE HUMIDADE

A natureza dos microrganismos obriga-os a assimilar os nutrientes através das suas paredes celulares semipermeáveis. Desta forma, para que a atividade microbiana se desenvolva nas melhores condições é necessário a existência de uma determinada quantidade de água (Felicía, 2009).

Ao longo do processo de compostagem verifica-se que o teor de água é afetado por duas razões, a produção de água pelos próprios microrganismos durante a decomposição da matéria orgânica, que é designada por água metabólica e a segunda razão está relacionada com as perdas de água sob a forma de vapor, causadas pelo aumento da temperatura, ventilação ou revolvimento do substrato, (Batista J. & Batista E., 2007).

A perda de água é considerada o principal fator pela diminuição da massa do substrato, que pode perder entre 40 e 80% de massa original. Esta redução contribui para uma menor libertação de CO₂ devido à parcial mineralização orgânica, (Cordeiro, 2010). Segundo Tchobanoglous et al (1993), a humidade para a compostagem deve situar-se entre 50 e 60%, no entanto, autores como Batista e Batista (2007) defendem que para a compostagem ocorrer de forma satisfatória se deve garantir um teor de humidade entre 45 e 70%.

Abaixo dos 40% de humidade a atividade microbiológica diminui bastante e a desidratação do material continua até atingir valores iguais ou inferiores a 20%. Este teor de humidade permite a obtenção de um composto biologicamente instável apesar de ser fisicamente estável. A atividade microbiana diminui quando o nível de humidade no composto se encontrar abaixo de 40 %, significando a desidratação do material inicial, e torna-se praticamente nula se atingir valores iguais ou inferiores a 20 %, resultando num composto fisicamente estável, mas biologicamente instável, (Fernandes, 2012).

Indiretamente a percentagem de humidade interfere no fator temperatura e a sua percentagem tende a diminuir ao longo do processo. Este parâmetro é de fácil controlo uma vez que para o aumento da humidade basta irrigar o substrato ou adicionar um material com maior teor de água; por sua vez, para diminuir este parâmetro basta secar o resíduo numa estufa, ou adicionar materiais mais secos, (Ventura, 2009).

A figura 1.16 apresenta os resultados de uma experiência realizada com diferentes percentagens de humidade e a sua influência ao nível da degradação do carbono orgânico.

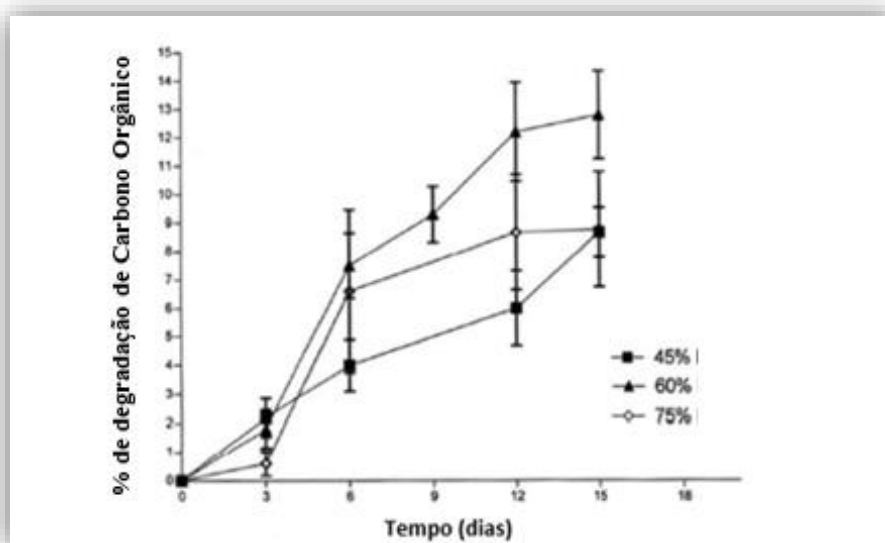


Figura 1.16 - Efeito de diferentes percentagens de humidade na degradação da matéria orgânica, (Adaptado de Júnior, 2012).

1.8.5 RAZÃO C/N

A presença de determinados nutrientes no substrato é indispensável para as necessidades dos microrganismos. Desta forma, níveis adequados de carbono (C), azoto (N), fósforo (P) e potássio (K) tornam-se essenciais num processo de compostagem. Por esta razão este parâmetro é considerado como o mais representativo do equilíbrio do processo, (PROSAB, 1996).

O carbono é a fonte de energia utilizada pelos organismos, o azoto entra na síntese do protoplasma, o fosforo é perdido por lixiviação e o potássio tende a manter-se constante. Destes elementos, o mais crítico acaba por ser o azoto uma vez que tende diminuir ao longo do processo devido à volatilização do amoníaco, (Ventura, 2009).

Para Tchobanoglous et al (1993) a razão para atividade microbiana encontra-se bastante ilimitada. No entanto Haug (1993) defende um intervalo de razão C/N mais limitativo que varia entre 35 e 40 para a razão ótima de carbono/azoto.

A razão C/N muito baixa provoca a perda de azoto através da volatilização da amónia, uma vez que o carbono ainda se encontra numa forma complexa de difícil biodegradabilidade, ao contrário do azoto que se encontra mais disponível.

Por outro lado, uma razão de C/N elevada provoca um desenvolvimento limitado dos microrganismos visto que a quantidade de azoto é insuficiente para a síntese das proteínas necessárias, (Mendes, 2009).

Contudo, independentemente do substrato inicial o valor razão C/N no final do processo varia sempre entre 10 e 20 devido às perdas de Carbono, (Fernandes, 2012).

A razão C/N selecionada afeta a temperatura do substrato e consequentemente o tempo necessário para a degradação da matéria orgânica como se pode verificar na figura 1.17.

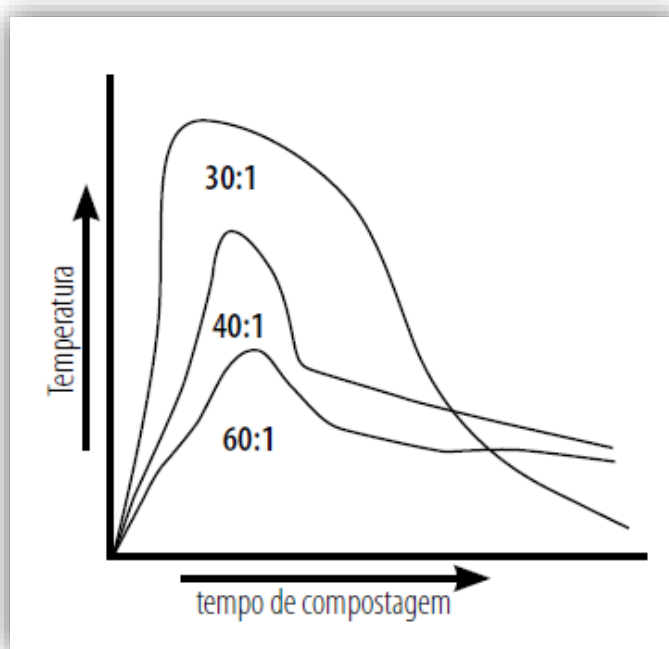


Figura 1.17 - Efeito da variação da razão C/N (Batista e Batista, 2007)

1.8.6 GRANULOMETRIA DO MATERIAL

A permeabilidade da matéria orgânica está dependente da porosidade do substrato a compostar. Esta, por sua vez, está dependente da humidade do próprio resíduo, estrutura física do mesmo e do tamanho das partículas. Estes fatores precisam de ser controlados para garantir que o processo ocorra em condições aeróbias, (Haug, 1993).

Um tamanho reduzido das partículas permite a estas apresenta uma área específica muito maior que por sua vez permite aumentar a área de contacto com os microrganismos. Esta maior área permite que os microrganismos trabalhem numa direção mais dispersa facilitando a degradação da matéria orgânica, (Mendes, 2009).

Segundo Batista J. & Batista E.,(2007) o intervalo ótimo das dimensões das partículas varia entre 1,3 e 7,6 cm; no entanto, segundo Haug (1993) partículas com espessura superior a 1 mm poderiam ser anaeróbias no seu interior devido à impossibilidade de o oxigénio se difundir nas mesmas.

Um tamanho adequando do material a compostar permite a criação de condições estruturais e de porosidade que permitem uma boa difusão de ar e água, facilitando desta forma a mistura e minimizando a compactação do material que leva à diminuição dos espaços livres, (Ventura, 2009). Na figura 1.18 encontra-se descritas as diferenças ocorridas para diferentes diâmetros de partículas.

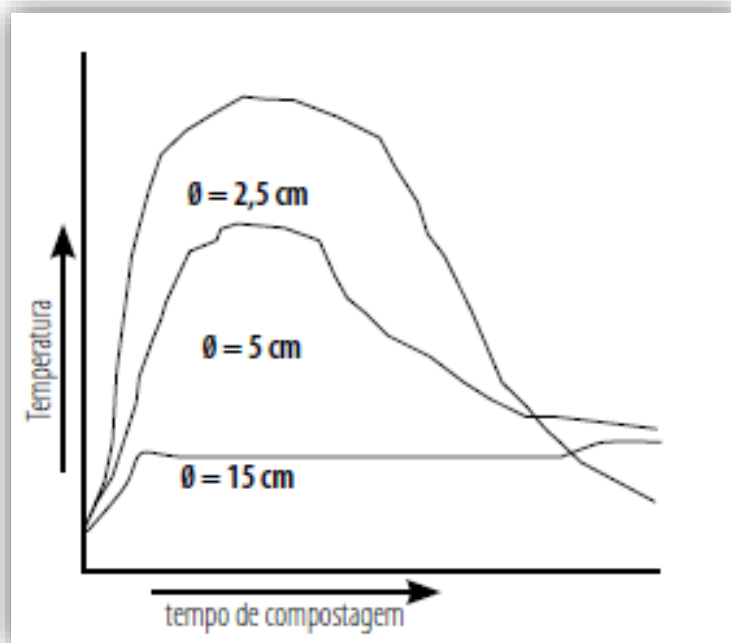


Figura 1.18 - Relação entre o diâmetro das partículas e a atividade dos microrganismos
(Batista J. & Batista E., 2007)

1.8.7 PH

Apesar de existir uma gama muito diversa de microrganismos que prosperam a diferentes valores de pH do meio, o intervalo ótimo para o processo de compostagem situa-se entre 6,5 e 8,0, (Epstein, 1997).

Apesar de o pH do substrato inicial não ter um papel significativo a nível do processo de compostagem para minimizar as perdas de azoto pela volatilização do amoníaco, o seu valor não deve ultrapassar os 8,5, (Tchobanoglou et al, 1993).

Na maioria das situações não se verifica a necessidade do controlo deste parâmetro visto existir uma regulação natural intrínseca à capacidade tampão da pilha de compostagem. No entanto, por vezes verifica-se a necessidade de o realizar para garantir a eficácia do processo, (Mendes, 2009).

Ao longo do processo ocorrem no entanto variações significativas em relação ao pH destacando-se 4 fases predominantes. Na figura 1.19 encontra-se representada uma figura típica da variação do pH ao longo do processo de compostagem.

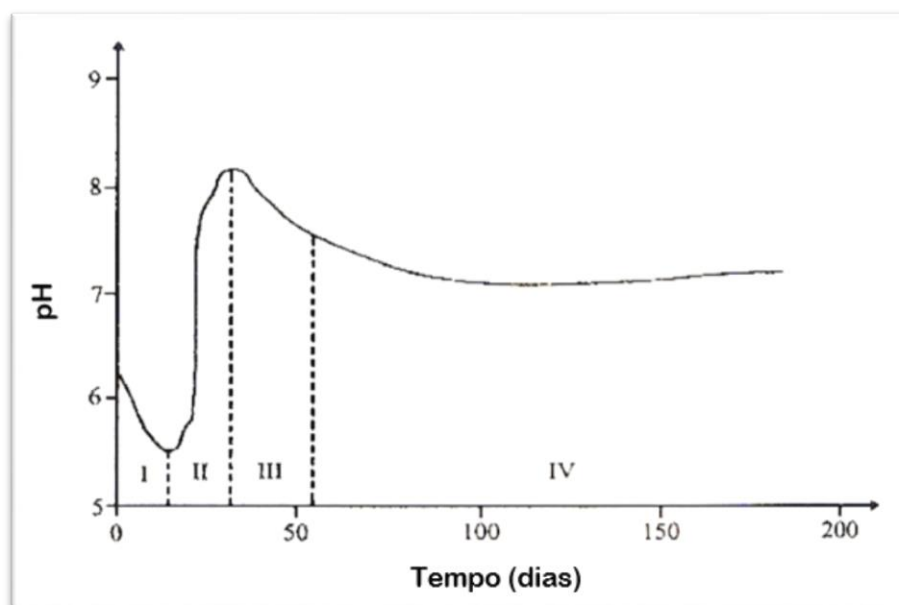


Figura 1.19 – Curva das principais variações de pH durante a compostagem, (Cordeiro, 2010).

As reações que ocorrem nas 4 fases demonstradas na figura 1.19 são as seguintes: (Cordeiro, 2010)

✗ **Fase I** – o pH reduz-se devido a uma elevada acidificação do meio, verifica-se a produção de CO_2 e ácidos orgânicos e os microrganismos que proliferam são de natureza mesófila.

✗ **Fase II** – o pH aumenta devido à produção de azoto na forma amoniacal, é uma fase alcalina com predominância de microrganismos mesófilos.

✗ **Fase III** – estabilização do pH devido a diminuição do amoníaco produzido na fase anterior quer por volatilização quer devido as bactérias nitrificantes, fase termófila.

✗ **Fase IV** - o valor de pH atinge valores neutros devido às reações de maturação e ao poder tampão do húmus.

1.8.8 CONDUTIVIDADE

A condutividade elétrica permite obter informações quanto a salinidade do composto, não permitindo no entanto a identificação dos sais presentes na matéria, (Santos, 2007).

A determinação da condutividade é frequentemente realizada com o intuito de se determinar o tipo de finalidade a que se destina o composto produzido. No início do processo de degradação verifica-se um decréscimo da condutividade em relação ao substrato inicial seguindo-se um aumento gradual da mesma até ao fim do processo. O decréscimo inicial está relacionado com a fixação da amónia e outros iões durante a intensa atividade metabólica dos microrganismos e o aumento está relacionado com a fixação de minerais ao longo da maturação do composto produzido, (Batista J. & Batista E., 2007).

1.9 COMPOSTO

1.9.1 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO COMPOSTO

A qualidade do composto obtido está diretamente relacionada com as características biológicas, químicas e físicas dos substratos utilizados, assim como da evolução e condução do processo de compostagem. Esta avaliação não se resume aos passos de estabilização e maturação do produto final, mas também a um conjunto de características tais como a cor, a granulometria, o odor, a contaminação com metais pesados e com inertes, o teor de humidade, de nutrientes e matéria orgânica, entre outros, (Felicía,2007).

Ao longo do tempo têm sido propostos vários parâmetros para a avaliação da estabilidade e da maturação dos compostos, verificando-se no entanto que não existe um único parâmetro que, por si só, permita avaliar a qualidade dos mesmos. Os métodos apontados têm complexidade de execução variável. Alguns são bastante utilizados, outros raramente são aplicados, (Cordeiro, 2010).

MÉTODOS ANALÍTICOS

De forma a acompanhar as transformações ocorridas e avaliar a evolução do processo de compostagem é necessário realizar análises periódicas a diversos parâmetros. De acordo com os parâmetros usualmente analisados, podemos classificar os métodos analíticos em: (Cordeiro, 2010)

MÉTODOS QUÍMICOS:

- ✗ Relação C/N
- ✗ Iões solúveis em água (ex: NO_3^- , NH_4^+)
- ✗ Matéria orgânica solúvel em água
- ✗ Capacidade de troca catiónica
- ✗ Composição da fibra bruta
- ✗ pH
- ✗ Substâncias degradáveis

MÉTODOS FÍSICOS:

- ✗ Temperatura
- ✗ Cor
- ✗ Odor
- ✗ Granulometria
- ✗ Teores de ar e água

ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS:

- ✗ Microrganismos indicadores
- ✗ Taxa de respiração
- ✗ Atividade e biomassa dos microrganismos

- ✗ Supressão de fitopatogénios

ENSAIOS BIOLÓGICOS:

- ✗ Germinação de agrião em extrato aquoso (teste de fitotoxicidade)
- ✗ Crescimento de azevém em substratos com composto
- ✗ Desenvolvimento de plântulas em extratos aquosos e no composto

ESPECTROSCOPIA:

- ✗ Em fase sólida
- ✗ Infravermelho

GRAU DE HUMIFICAÇÃO:

- ✗ Substâncias húmicas totais;
- ✗ Teores e relações de ácidos húmicos, fúlvicos e de frações não húmicas;
- ✗ Teores de grupos funcionais.

TESTES BIOLÓGICOS

Os métodos biológicos permitem avaliar o composto com um todo, num ambiente semelhante ao que lhe está destinado enquanto os métodos químicos apenas permitem obter a quantificação de um elemento ou substância presente no composto (Santos, 2007).

✗ TESTES PARA A AVALIAÇÃO DE FITOTOXICIDADE - INDICADOR DE MATURAÇÃO

O termo fitotoxicidade está relacionado com o fenómeno de acumulação de substâncias potencialmente nocivas nos tecidos das plantas. Esta acumulação atinge por vezes níveis que podem afetar o seu crescimento e desenvolvimento ótimos, (Cordeiro, 2010).

Nas fases iniciais do processo de compostagem verifica-se um aumento da toxicidade relacionado com o pico do crescimento microbiano e com a biodegradação dos materiais orgânicos facilmente fermentescíveis que libertam metabolitos tóxicos, (Santos, 2007).

Sendo a fitotoxicidade um parâmetro variável ao longo do processo de compostagem, e estando a sua ausência correlacionada com os graus de estabilização e de maturação dos compostos, a sua determinação revela-se muito importante com vista a evitar problemas associados quer à germinação de sementes, quer ao crescimento e desenvolvimento de plantas aquando da sua utilização. Os ensaios para além de serem utilizados para avaliar a toxicidade do composto também são utilizados, como parâmetro comum, quando se quer comparar diferentes sistemas de compostagem, (Félícia, 2007).

Diversos autores referem que o período de produção de toxinas atinge valores menores em processos com arejamento forçado quando comparados com processos onde o arejamento se efetua por revolvimento da biomassa,

sendo que a toxicidade das biomassas é eliminada antes do final da fase termófila nos casos de arejamento forçado. Para além da forma de arejamento, a própria composição dos substratos interfere na produção de substâncias, (Cordeiro,2010).

Existe uma variedade de testes biológicos para determinação da fitotoxicidade dos compostos; no entanto, os mais utilizados são o teste de germinação e o teste de crescimento. Este último surgiu na tentativa de se encontrar métodos de avaliação que permitam obter resultados mais rapidamente do que os testes de germinação, (Felicía,2007).

TESTES DE GERMINAÇÃO:

Os ensaios de germinação têm como objetivo comprovar os possíveis efeitos fitotóxicos dos compostos, e consistem em determinar, comparando com um ensaio em branco, a percentagem de germinação na presença de uma amostra de composto, (Cordeiro,2010).

O teste de germinação proposto por Zucconi, F.& Bretoldi, M. (1987) é um teste onde a avaliação da fitotoxicidade é feita através da determinação do Índice de Germinação (IG) com *Lepidium sativum* L., a partir de diferentes concentrações de extrato aquoso esterilizado por filtração, o qual se obtém por extração da amostra de composto previamente humedecida a 60% à pressão de 250 atm, durante 15 minutos. Se a % de germinação, para o *Lepidium sativum* L., face ao ensaio em branco for superior a 60% o composto é considerado não fitotóxico.

A maturação do composto pode ser avaliada considerando que: percentagens de germinações superiores a 90 indicam um composto bem maturado; entre 80 e 90 um composto maturado e inferior a 80, um composto não maturado. De forma a garantir o crescimento das sementes estas são colocadas em caixas de petri, numa estufa durante 24 horas. Após este período efetua-se a contagem das sementes germinadas e a medição dos comprimentos das radículas (Zucconi, F.& Bretoldi, M., 1987)

Segundo Fairbrother A. & Kapustka L.A. (1997) o teste de germinação de sementes é relativamente insensível a muitas substâncias tóxicas, sendo que esta insensibilidade está associada a dois principais fatores. O primeiro relaciona-se com o facto de as plantas embrionárias armazenarem as suas necessidades nutricionais isoladas do ambiente exterior. O segundo fator está relacionado com a sua incapacidade de absorver diversos compostos químicos. Por sua vez, o teste de crescimento não apresenta estas deficiências, (Felicía,2007).

O teste de germinação recorrendo à alface como semente apresenta uma maior afinidade a agentes de fitotoxicidade presentes nos compostos do que se efetuar o teste com cevada. No entanto, o teste com cevada parece apresentar maior sensibilidade biológica, pois reflete o efeito de um resíduo orgânico sobre a produção de biomassa de uma cultura, (Cordeiro, 2010).

TESTES DE CRESCIMENTO

Um dos testes de crescimento mais utilizados é o proposto por Jodice (1989), que é um teste realizado em vaso que permite avaliar o crescimento utilizando como semente o *Lepidium sativum* L. Neste teste de crescimento a amostra de composto é misturada em diferentes proporções com turfa (normalmente, 25% e 50% (v/v) de composto, (Santos, 2007).

Os ensaios decorrem durante 14 dias contados após a germinação de pelo menos 50% das sementes das amostras. Após o período de crescimento, avaliam-se os pesos secos dos materiais vegetais obtidos nos ensaios e comparam-se estes valores com um ensaio branco, realizado apenas com turfa. Todos os ensaios devem ser realizados nas mesmas das condições de forma a reduzir interferências causadas por diferentes níveis de luz, frequência de rega, temperatura ambiente, evaporação, insolação, entre outras, (Cordeiro, 2010).

Com estes valores obtidos procede-se ao cálculo do índice de crescimento (IC). O IC é a relação entre a massa seca dos materiais vegetais obtidos nas amostras com composto e no branco, (Santos, 2007).

Nos ensaios de crescimento contabilizam-se de uma forma “integrada” a germinação das sementes e o crescimento das sementes germinadas, visto que não se consegue efetuar a distinção entre os efeitos provocados pela toxicidade na germinação ou no crescimento da planta, (Felicía, 2007).

A interpretação dos resultados pode ser baseada na tabela 1.3 mencionada por Gonçalves e Batista (2001) na Proposta de Regulamentação para a Qualidade do Composto para Utilização na Agricultura.

Tabela 1.3 - Interpretação dos resultados da produção relativa, em ensaios de vaso segundo Gonçalves e Batista (2001)

Situação	IC		Interpretação
	25 % Composto	50% Composto	
A	>0,90	>0,90	O composto apresenta ótima qualidade e pode ser usado como substrato de suporte de culturas
B	>0,90	≤0,90	O composto está suficientemente maturado para ser usado como corretivo orgânico do solo mas não pode ser usado como constituinte de suportes de culturas
C	≤0,90	≤0,90	O composto não apresenta qualidade para ser usado como corretivo orgânico e a sua utilização é restrita

✕ **TESTE DE DEWAR -ESTABILIDADE DE UM COMPOSTO:**

Muitos índices da maturidade do composto medem também a sua estabilidade, uma vez que quase todos os compostos devem apresentar um grau de maturação razoável quando estão estabilizados. Porém, é importante realçar que a estabilização por si só não determina o grau de maturação do composto (Felicía, 2007).

O teste de Dewar, ou teste de auto-aquecimento, é um teste bastante utilizado na Alemanha que permite avaliar a variação da temperatura de uma amostra de composto colocada num recipiente térmico (Dewar flask) em intervalos regulares (Santos, 2007).

Algumas metodologias sugerem a realização do teste durante 72 horas mas o período de duração mais aconselhado são os 10 dias, (Cordeiro, 2010).

A temperatura máxima atingida é função da atividade biológica do composto e depende do estado de degradação da matéria orgânica presente na amostra, determinando a classe de estabilidade a que o composto pertence. Os valores do teste de auto-aquecimento relacionam-se com os testes respirométricos, (Santos, 2007).

Frost et al. (1992) e Iannotti et al. (1993) referem que o teor de humidade da amostra e a densidade afetam os resultados deste teste, devido ao elevado calor específico da água relativamente ao dos sólidos do composto, determinando como teor de humidade da amostra o valor 25%; no entanto, para este teor a atividade microbiológica é limitada, (Santos, 2007).

Segundo o documento de referência LAGA – Merkblatt M10 (1995) referido por Cordeiro (2010) os compostos são classificados em função da temperatura máxima alcançada no teste de auto aquecimento de acordo com a tabela 1.4.

Tabela 1.4 - Classes de estabilidade para composto adaptado de LAGA – Merkblatt M 10 (1995)

Designação	Temperatura máxima	Classe de estabilidade
Material inicial	>60°C	I
Composto fresco	50-60°C	II
	40-50°C	III
Composto maturado	30-40°C	IV
	<30°C	V

Este teste permite o desenvolvimento de uma sucessão natural da microflora do composto similar à que ocorre na pilha de compostagem, partindo do pressuposto de que a presença de calor no composto é um sinal de falta de estabilidade, (Santos, 2007).

Segundo, Gonçalves e Baptista, (2001) os resultados obtidos por este teste podem ser avaliados segundo três categorias tendo por base, para além da temperatura os resultados do teste de fitotoxicidade, como se pode analisar na tabela 1.5:

Tabela 1.5 - Classes de estabilidade para compostos segundo Gonçalves e Baptista (2001)

Designação	Temperatura máxima	Critério adicional	Classe de estabilidade
Composto fresco	>50°C	-	I
Composto semi-maturado	40-50°C	No teste de fitotoxicidade, a produção de cevada nos vasos contendo turfa e composto seja superior a 80 % da produção de cevada nos vasos contendo apenas turfa;	II
			III
Composto maturado	<40°C	No teste de fitotoxicidade, a produção de cevada nos vasos contendo turfa e composto seja superior a 90 % da produção de cevada nos vasos contendo apenas turfa.	IV
			V

Os compostos classificados como frescos ou semi-maturados são utilizados em solos destinados a culturas arbóreas e arbustivas (vinha, olival, pomares, etc.), culturas arvenses, pastagens, floricultura, horticultura e relvados, sendo necessário garantir que o espalhamento e incorporação sejam efetuados pelo menos 4 e 3 semanas, respetivamente, antes da sementeira ou plantação. Os compostos considerados maturados podem ser utilizados em solos destinados a culturas arbóreas e arbustivas, culturas arvenses, pastagens, floricultura, horticultura, relvados, etc., no caso em que o espalhamento e incorporação sejam efetuados num período inferior a 3 semanas, antes da sementeira ou plantação, (Santos, 2007).

✕ GRAU DE HUMIFICAÇÃO:

O grau de humificação, do latim “humu” que significa terra, é considerado em muitos países um parâmetro de avaliação da estabilização e maturação do composto apesar de não reunir um consenso em relação ao mesmo, (Felicía, 2007).

As substâncias húmicas, especialmente os ácidos húmicos, representam a fração estável da matéria orgânica do composto e são originadas durante o processo de humificação que é um processo bioquímico muito complexo. É na fração humificada que reside a grande maioria das propriedades que conferem valor fertilizante e ecológico à matéria orgânica dos solos, nomeadamente, o aumento da capacidade de troca catiónica que permite fixar nutrientes minerais, o aumento do poder tampão, a melhoria da estrutura, a regularização mediante a formação de quelatos estáveis, da biodisponibilidade e da mobilidade dos micronutrientes e metais pesados, entre outra, (Santos, 2007).

As substâncias húmicas formam o principal constituinte orgânico do solo e representam a forma mais evoluída e estável da matéria orgânica, sendo é possível dividir as substâncias húmicas com base na sua solubilidade em ácidos e bases em três frações, os ácidos húmicos (AH) solúveis em soluções alcalinas e insolúveis em soluções ácidas, os ácidos fúlvicos (AF) solúveis em soluções alcalinas ou ácidas e, a humina que é insolúvel tanto em soluções alcalinas como ácidas, (Felicía, 2007).

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão referidas as condições referentes à instalação experimental e à instrumentação necessária para a recolha em contínuo da temperatura. Serão também referidas as considerações realizadas quanto à alimentação do compostor bem como o plano de amostragem definido. Tendo em conta a diversidade de testes realizados, encontrar-se-á no mesmo capítulo uma descrição sumária dos procedimentos bem como dos métodos utilizados.

2.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZADA

Neste projeto utilizou-se um reator de escoamento vertical existente nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O reator foi dimensionado por um grupo de Alunos de Engenharia do Ambiente numa unidade curricular transversal existente no mesmo curso. O objetivo do reator seria a sua utilização para a compostagem de relva proveniente dos espaços verdes da faculdade.

O dimensionamento do volume do reator teve como ponto de partida a quantidade de relva gerada na faculdade durante um ano e para tal foi requerido aos alunos a realização de uma experiência para densidade da relva. Esta experiência estimou que a relva na faculdade teria uma densidade de $700,5 \text{ kg/m}^3$. Na seguinte tabela encontram-se os dados utilizados (base húmida) como base para o cálculo do reator:

Tabela 2.1 - Dados necessários para o cálculo do volume teórico do reator

Características	Valores admitidos
Densidade da relva	$700,5 \text{ kg/m}^3$
Área da relva na faculdade	23010 m^2
Massa relva/ m^2	$0,3178 \text{ kg/m}^2$
Massa relva disponível/mês	7314 kg
Massa relva disponível/dia	243,8
Massa relva disponível para compostagem/dia	121,9 kg
Porosidade da relva	0,875

Foi ainda assumido para o cálculo do volume que apenas metade da relva (121,9 kg) cortada diariamente na faculdade iria ser utilizada para este projeto (sendo que a restante metade seria utilizada para um projeto de digestão anaeróbia) e que o tempo de residência da mesma no reator era de 20 dias (como já foi referido, este valor é apontado pela literatura como o razoável para um sistema de compostagem acelerada). A expressão teórica na qual foi baseado o cálculo do volume é a seguinte:

$$V = \left[V_i - \frac{2}{3} \times (V_i - V_f) \right] \times t \quad (1)$$

Legenda:

V - Volume do reator – m³

V_i – Volume de relva alimentada diariamente ao reator (m³/dia)

V_f - Volume de composto retirado diariamente (m³/dia)

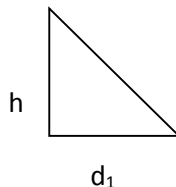
t - Tempo de residência (20 dias)

Durante o dimensionamento, foi assumido pelos alunos que para efeitos de cálculos, a quantidade de massa que entra diariamente no compostor seria igual à quantidade de composto removido diariamente. Foi também adotado como configuração para o reator uma forma cilíndrica com fundo cônico de forma a minimizar a existência de arestas que facilitariam a existência de zonas anaeróbias. Após a aplicação da expressão anterior, considerando que o volume de relva inicial seria de 0,174 m³ obteve-se que seria necessário um reator com 3,48 m³.

Para o cálculo do diâmetro recorreu-se à equação matemática para o volume do cilindro obtendo-se um diâmetro de 1,49 metros. No entanto foi ainda necessário efetuar o cálculo correspondente à altura do cone. Para realizarem esse cálculo os alunos assumiram que o talude seria de cerca de 50° e a o fundo do cone teria uma abertura com 0,35 metros (d_2):

$$d_1 = \frac{D-d_2}{2} = 0,57m \quad (2)$$

$$\tan \theta = \frac{h}{d_1} \leftrightarrow h = \tan(50^\circ) \times 0,57m = 0,68m \quad (3)$$



O volume do reator final foi calculado com base nestes valores e assumindo que a altura máxima do reator seria de 2 metros (altura máxima tendo em conta a futura localização do reator) apresenta-se exposto de seguida o raciocínio elaborado:

$$V_{reator} = V_{cone} + V_{cilindro} \quad (4)$$

$$V_{reator} = \frac{\pi}{3} \times \frac{D^2}{4} \times h + \pi \times \frac{D^2}{4} \times (H - h)$$

$$V_{reator} = \frac{\pi}{3} \times \frac{1,49^2}{4} \times 0,68 + \pi \times \frac{1,49^2}{4} \times (2 - 0,68)$$

$$V_{reator} = 2,661 m^3$$

Legenda:

D - Diâmetro Reator – m; h - Altura cone – m; d_2 - Diâmetro cone – m; H - Altura do Reator – m

Posteriormente a esta fase os alunos encomendaram um reator com as dimensões anteriormente especificadas; no entanto, o mesmo nunca foi colocado em funcionamento até à realização desta dissertação. Na figura 2.1 encontram-se as fotos com visualização frontal do reator utilizado para estes ensaios.



Figura 2.1 - Fotografia frontal da instalação de compostagem

O reator de compostagem adquirido possui 4 pontos de recolha (situados a diferentes alturas) nos quais se podia efetuar a recolha de amostras recorrendo a uma sonda de amostragem também adquirida pelos alunos aquando da encomenda do compostor. Para além destes 4 pontos existiam mais 16 pontos de amostragem de menor diâmetro situados ao longo do cilindro e 4 pontos de amostragem situados no cone que permitiriam a aquisição de temperatura e pH no seio do reator. Como se pode observar na fotografia, o reator tinha uma abertura na parte inferior pela qual se efetuou a recolha do material compostado.

A abertura da base cônica encontrava-se tapada por uma placa de metal que teria que se remover para retirar o composto. Esta placa foi trocada para estes ensaios por uma placa perfurada de forma a permitir uma maior troca de

ar na base do reator de forma a evitar a criação de um ambiente anaeróbio no final, permitindo também o escoamento de algum lixiviado formado durante o processo.

O reator encontrava-se ainda equipado por um sistema de difusor de ar que basicamente era constituído por um tubo perfurado que realizava a difusão do ar. A localização do tubo perfurado de forma circular encontrava-se na fronteira entre a zona cilíndrica e cônica.

2.2 SISTEMA DE AREJAMENTO

A instalação de ar comprimido não estava no entanto dimensionada de forma completa e foi necessário efetuar essa etapa do processo. Após uma pesquisa realizada sobre as peças e mecanismos necessários para o seu correto dimensionamento procedeu-se ao contacto com lojas e empresas para a instalação. Tendo em conta os orçamentos obtidos optou-se por efetuar a compra apenas das peças e efetuarmos nós a montagem. Para além disso, foi necessário encomendar um rotâmetro que permitisse regular o caudal para a quantidade teórica de oxigénio estimada.

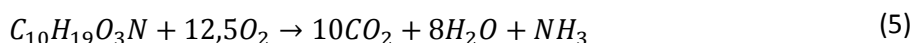
O sistema de arejamento consistiu no dimensionamento de um sistema que permitia a alimentação de ar comprimido a uma tubagem circular, perfurada em três posições que se encontrava dentro do reator e que tinha como função realizar a distribuição do ar. A tubagem em causa está perfurada em direção ao centro, zona superior e inferior do reator.

A geometria e disposição dos furos da tubagem foi da inteira responsabilidade dos alunos que elaboraram o projeto e permite prever a existência de uma má condução de ar junto às paredes visto que não existia perfuração da tubagem nesta direção. No entanto, não foi possível corrigir esta situação visto que a instalação já se encontrava fixa ao reator. Na figura 2.2 encontra-se uma fotografia do tubo de distribuição do ar que se encontra no reator.



Figura 2.2 - Fotografia da tubagem perfurada e do sistema de arejamento adotado

As necessidades de arejamento do reator foram calculados recorrendo à fórmula química da relva e assumindo que a % de sólidos voláteis biodegradáveis é de 60% e a eficiência da biodegradação de 80%, (Tchobanoglous et al, 1993). Todas as etapas correspondentes aos cálculos encontram-se apresentadas de seguida:



Considerações:

Eficiência da degradação: 80% | Sólidos voláteis biodegradáveis: 60% | Densidade do ar a 25 °C = 1,18 kg/m³ | Fração mássica de oxigénio no ar=23% | Densidade da relva=700,5 kg/m³ | Volume reator=2,661 m³ | M (Relva)=201,25 g/mol | M (O₂)=32,0 g/mol

$$\text{Massa de relva para preencher reator} = 2,661\text{m}^3 \times 700,5\text{kg/m}^3$$

$$\text{Massa de relva para preencher reator} = 1864\text{kg}$$

$$n(\text{Relva}) = \frac{m}{M} \leftrightarrow n = \frac{1864000\text{ g}}{201,25\text{ g/mol}} \leftrightarrow n = 9262\text{ mol}$$

$$n(\text{O}_2) = 9262\text{ mol} \times 12,5 \leftrightarrow n = 1,2 \times 10^5\text{ mol}$$

$$m(\text{O}_2) = n \times M \leftrightarrow m(\text{O}_2) = 1,2 \times 10^5\text{ mol} \times 32,0\text{ g/mol} \leftrightarrow m(\text{O}_2) = 3,7 \times 10^6\text{ g} \quad (6)$$

Como se pretende que a degradação ocorra em 20 dias, a necessidade de oxigénio para degradar a totalidade da relva foi dividida por 20:

$$m(\text{O}_2) = \frac{3,7 \times 10^6\text{ g}}{20} = 1,9 \times 10^5\text{ g/dia}$$

Incluindo as percentagens de eficiência de degradação e sólidos voláteis biodegradáveis:

$$m(\text{O}_2) = 1,9 \times 10^5\text{ g} \times 0,60 \times 0,80 \leftrightarrow m(\text{O}_2) = 8,9 \times 10^4\text{ g/dia}$$

Fazendo a conversão das necessidades de oxigénio para as necessidades de ar tendo em conta que a percentagem de oxigénio na atmosfera corresponde a 23%:

$$m(\text{ar}) = \frac{8,9 \times 10^4\text{ g} \times 100}{23} \leftrightarrow m(\text{ar}) = 3,9 \times 10^5\text{ g/dia} \quad (7)$$

$$V(\text{ar}) = \frac{m(\text{ar})}{\rho_{\text{ar}}}$$

$$V(\text{ar}) = \frac{3,9 \times 10^5\text{ kg}}{1,18\text{ kg/m}^3} \leftrightarrow V(\text{ar}) = 3,3 \times 10^2\text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q(\text{ar}) = \frac{3,3 \times 10^2\text{ m}^3}{24 \times 60} \leftrightarrow Q(\text{ar}) = 0,23\text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q(\text{ar}) = 227,5\text{ L/min}$$

Apesar de se ter obtido este valor como o caudal de ar mínimo a fornecer ao reator, não foi possível efetuar este fornecimento devido à inexistência de um rotâmetro nas instalações que permitisse medir este caudal para o abastecimento. Desta forma, nas primeiras fases do projeto o caudal fornecido foi bastante inferior ao desejável, cerca de 9, 44 L/min. Durante esses ensaios, de forma a se tentar minimizar o impacto causado pela quantidade em falta de ar optou-se por deixar abertos todos os pontos de amostra do reator de forma a permitir alguma circulação de ar.

De referir que paralelamente ao arranque do compostor se pretendeu realizar o arranque de um sistema de digestão anaeróbia dimensionado por um outro grupo de alunos. No entanto, a instalação não foi entregue pelos responsáveis pela construção em tempo útil, ficando essa etapa da dissertação excluída, tendo-se executado no entanto algumas etapas a nível de instrumentação.

2.3 INSTRUMENTAÇÃO

Surgiu a necessidade de se proceder à monitorização em contínuo de alguns parâmetros durante o período de duração dos ensaios. Inicialmente os parâmetros que se pretendiam analisar em contínuo eram a temperatura e o pH no reator de compostagem. No entanto acabou por só se efetuar posteriormente a análise em contínuo da temperatura visto haver pouco fluido no reator para a medição do pH (sendo este analisado no laboratório).

O software adotado para proceder à aquisição dos dados foi o Labview. Este é um software amplamente utilizado para a aquisição de sinal, análise de medidas e apresentação de dados. O Labview devido à sua relativa simplicidade permite uma análise instantânea dos dados adquiridos e um tratamento dos mesmos de forma prática e direta (National Instruments, 2014).

Foram criados 2 ficheiros em Labview para aquisição das temperaturas e do pH (o do pH acabou por não ser utilizado). Estes ficheiros permitiam a leitura em tempo real dos parâmetros medidos pelos equipamentos.

Inicialmente adotou-se a colocação de 4 termopares para medição da temperatura colocados lateralmente no reator de forma a serem medidas as temperaturas ao longo do reator com o intuito de se identificar o perfil de temperatura. Posteriormente verificou-se que devido à pressão exercida pela relva os termopares não mantinham a sua posição e iam acompanhando a descida dos resíduos ao longo do reator. Por esta razão, verificou-se a necessidade de se adquirirem umas camisas de proteção em metal para os termopares manterem a sua posição.

Enquanto as proteções estavam a ser fabricadas optou-se por remover os termopares colocados lateralmente e colocaram-se antes na vertical, suspensos a diferentes alturas. Esta configuração foi posteriormente adotada como definitiva (após a chegada das proteções) devido à facilidade com que os termopares poderiam ser removidos para manutenção.

Na compostagem procedeu-se à medição em contínuo da temperatura tendo-se criado um ficheiro em labview para o seu registo nos quatro pontos de medição definidos. Com o intuito de obter o perfil o mais real possível estabeleceu-se como posições: 1,24 m; 1,04 m; 0,80 e 0,70 m (estes valores correspondem à profundidade a que se encontravam

mergulhados os termopares). Na figura 2.3 encontra-se o layout obtido para o registo das temperaturas bem como o diagrama de montagem das conexões necessárias para se proceder à aquisição e gravação dos dados em contínuo (figura 2.4). A disposição das temperaturas no círculo da figura 2.3 é a representação da disposição dos termopares no reator.

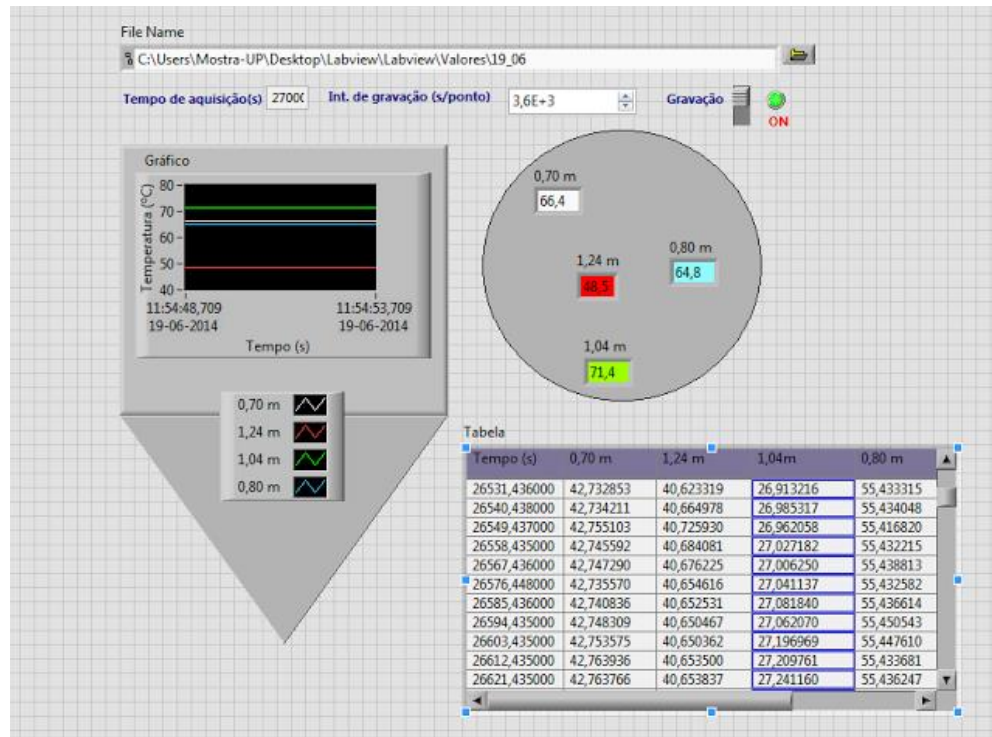


Figura 2.3 - Layout obtido para a medição da temperatura – Compostagem

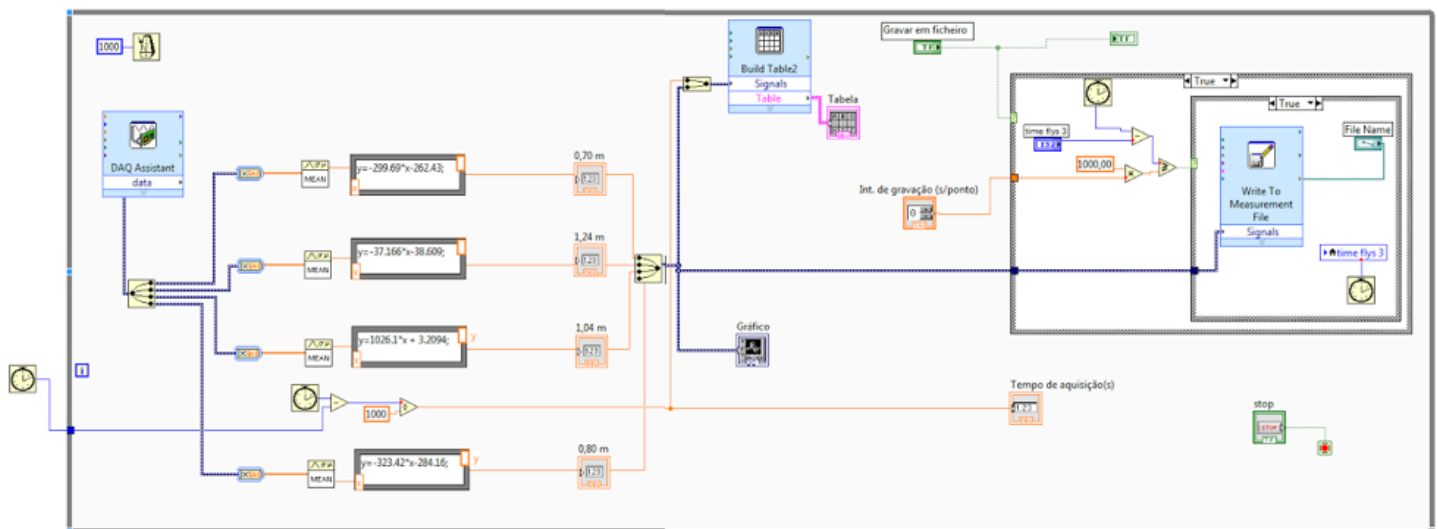


Figura 2.4 - Esquema de Labview para aquisição de temperatura – Compostagem

No anexo I podem ser consultados os esquemas desenvolvidos para a determinação do pH e para a determinação da temperatura para o sistema de digestão anaeróbia, que apesar de não terem sido utilizados foram criados para esse efeito.

Os termopares são sensores de temperatura relativamente simples e de baixo custo que geram uma Força Eletromotriz (FEM) responsável por permitir a leitura dos valores de temperatura. A constituição dos termopares envolve a presença de dois metais distintos unidos pela sua extremidade. Os termopares selecionados tanto para a compostagem como para a digestão anaeróbia são do tipo K, formados por fios de Chromel, como elemento positivo, e Alumel, como elemento negativo, (National Instruments, 2014).

Um dos termopares foi ligado a um medidor de temperatura digital que permitiu analisar em tempo real a temperatura dentro do compostor. Este medidor foi ligado a uma placa de aquisição que por sua vez se encontrava ligada ao computador para permitir a aquisição de dados pelo Labview. Os restantes 2 termopares implicaram uma ligação a transmissor de temperatura que por sua vez foi ligado à placa de aquisição e esta ao computador. Este equipamento permitiu que o sinal captado pelo termopar fosse lido pela placa de aquisição. Para o processo de compostagem utilizou-se uma placa de aquisição da National Instruments, tendo sido necessário instalar os drivers da mesma para permitir o funcionamento do Labview (DAQ). A diferença ao nível de aquisição dos termopares está relacionado com a utilização de equipamentos adquiridos anteriormente (digitais) e a necessidade de aquisição de mais equipamentos (optou-se por comprar transmissores por terem um custo mais baixo).

A placa de aquisição utilizada fornecia os valores de tensão detetada em milivolts, sendo necessário proceder à calibração dos termopares para permitir a conversão de tensão para temperatura.

Esta calibração foi efetuada submetendo os termopares a duas temperaturas distintas (0 °C e 100 °C). Para a elaboração das retas de calibração foram utilizados cerca de 50 valores de amostragem. Também se efetuou a calibração dos medidores de pH em contínuo e dos termopares para o sistema de digestão anaeróbia apesar de não terem sido utilizados. Na figura 2.5 podem ser consultadas fotografias representativas do sistema de aquisição de dados criados para o presente projeto.

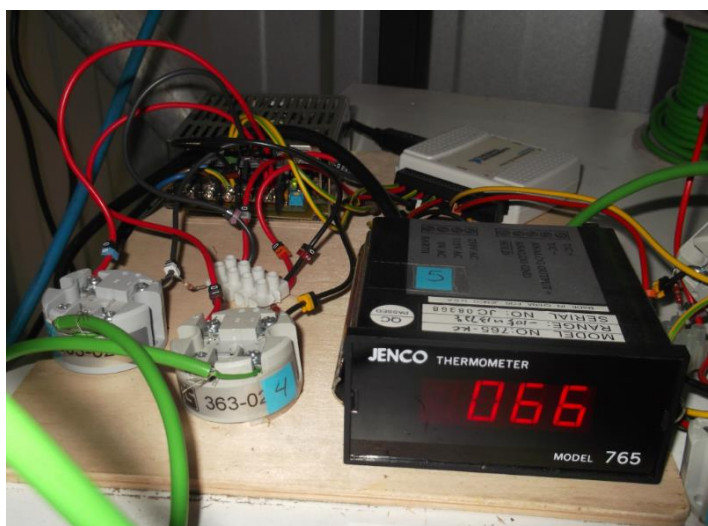


Figura 2.5 - Esquema de instrumentação - Reator de Compostagem

2.4 ALIMENTAÇÃO DO REATOR

A mistura a adicionar ao reator é um dos aspetos mais importantes relacionados com a compostagem visto que está diretamente relacionado com a qualidade do produto obtido e com a eficiência do processo. Inicialmente ponderou-se realizar uma mistura constituída por relva, restos de vegetais, borra de café e ramos secos. Alguns destes materiais chegaram a ser recolhidos para serem incluídos no processo; no entanto, visto que se tratava do arranque do sistema optou-se por realizar apenas a compostagem com relva, visto que a razão C/N da relva segundo a literatura consultada se aproxima dos valores ótimos para a compostagem. Na tabela 2.2 seguinte encontram-se as características dos materiais que foram inicialmente pensados para o arranque do processo.

Tabela 2.2 - Características de alguns resíduos disponíveis na faculdade para o processo de compostagem

Material	Razão C/N	Teor humidade (%)
Relva verde	24 ^a	50-90 ^c
Borra de café	20,1 ^b	60-70 ^c
Restos de vegetais	34,8 ^a	60-90 ^c
Ramos secos	200-500 ^a	30-60 ^c

a- Tchobanoglous et al, 1993

b- Fonseca, 2012

c- Dinis, 2008

3.4. Monitorização do processo de compostagem

A monitorização do processo foi garantida através do conhecimento das condições operatórias. O reator utilizado encontrava-se aberto na extremidade superior e como tal encontrava-se a uma pressão de 1 bar.

Em relação aos caudais de arejamento, a monitorização do mesmo foi realizada recorrendo a rotâmetros. Como já foi referido, inicialmente o rotâmetro que estava a ser utilizado não atingia o nível de arejamento necessário e como tal foi necessário adquirir outro.

A temperatura foi registada de forma contínua e processada em labview a cada 60 minutos, com a colocação inicialmente horizontal e posteriormente vertical de termopares a diferentes alturas. No entanto, paralelamente a esta análise foi realizada uma recolha de temperaturas medida lateralmente ao longo de 20 pontos de amostragem situados ao longo de todo o reator na longitudinal. Esta medição lateral foi realizada inicialmente por um termopar que permitia atingir apenas 20 cm, sendo posteriormente utilizado um termopar de 50 cm para realizar esta análise.

A medição de oxigénio no reator foi um dos objetivos que não conseguiu ser alcançado aquando do arranque do processo devido à inexistência de equipamentos para esse efeito nas instalações. Tendo em conta o custo dos

mesmos, optou-se por procurar uma solução interna na faculdade e conseguiu-se encontrar um medidor de oxigénio disponível. Para a sua medição foi necessário inserir no reator 4 tubos de pvc perfurados. No entanto, a quantidade de oxigénio no reator rondava os 18,4 %, ou seja, um valor muito próximo da % de oxigénio na atmosfera (21%). Por esta mesma razão optou-se por não realizar mais medições visto que este parâmetro não era preocupante nas condições em que realizamos as nossas experiências.

Foram retiradas amostras de material ao longo de 4 pontos situados a diferentes alturas e foram analisadas em laboratório. As análises incluíram o teor de humidade, o teor da matéria orgânica, o pH, a condutividade elétrica, a densidade por picnómetro, carência química de oxigénio (CQO), o Free Air Space – FAS. Foi ainda realizada uma análise dos constituintes da amostra pelo método da análise elementar para se efetuar o cálculo da razão C/N. Também se efetuou a análise de azoto pelo método de Kjeldhal para efeitos de comparação e a carência bioquímica de oxigénio (CBO) (cujos dados não foram utilizados devido a incoerências dos mesmos).

Realizou-se ainda uma análise microbiológica ao resíduo compostado, de forma a identificar a presença de *escherichia coli* e coliformes fecais, (no laboratório não foi possível efetuar a análise para detetar a presença de salmonelas). Foi ainda avaliada as variações da presença de Fungos, Actinomicetes e Heterotróficos quando sujeitos a diferentes temperaturas.

Efetuuou-se também uma análise relativamente à presença de metais pesados no composto saído do reator (sem nenhum dia de maturação). Os metais analisados foram o cádmio, cobre, crómio, chumbo, níquel, zinco e mercúrio.

Os procedimentos adotados para estas análises encontram-se identificados no plano de amostragem.

2.5 PLANO DE AMOSTRAGEM

Como foi referido anteriormente, as amostras foram recolhidas ao longo de um período de tempo e foram analisadas em laboratório. As recolhas foram iniciadas no dia 19 de maio e terminadas no dia 12 de junho, tendo sido realizadas às segundas, quartas e sextas-feiras. A dada altura não existia material ao nível do ponto de amostragem superior não se recolhendo as respetivas amostras.

A recolha das amostras para a análise microbiológica e para os metais pesados foi realizada no dia 17 de junho, tendo este período sido considerado o mais estável até ao momento pelo aspeto visual recolhido de composto.

Posteriormente foram recolhidas mais 4 amostras de material entre o dia 15 de julho e o dia 23 de julho para se analisarem os efeitos da rega aplicada ao compostor (de dois em dois dias).

Os métodos seguidos para cada um dos parâmetros analisados serão referidos de seguida, no entanto, os procedimentos seguidos podem ser consul do presente documento. No anexo III podem ser consultadas algumas fotografias dos equipamentos e técnicas aplicadas.

2.5.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

A determinação do teor de humidade nas amostras baseou-se no procedimento descrito na ASTM D2216-98, Standard test method to determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, aprovada pela American Society for Testing and Material.

2.5.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

O teor de matéria orgânica foi calculado tendo como base de referência a ASTM D 2974 – Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils.

2.5.3 DETERMINAÇÃO DO PH

Para determinar o pH recorreu-se a elétrodos específicos, usando extratos aquosos obtidos seguindo (apesar de ter sido necessário algumas modificações) a EN 13037:1999 - Determination of pH.

2.5.4 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A determinação da condutividade elétrica baseou-se na EN 13038:1999 - Determination of electrical conductivity. Tendo em conta as semelhanças existentes entre este método de determinação e o método utilizado para a determinação do pH optou-se por utilizar a suspensão preparada para o mesmo para se medir também a condutividade elétrica num equipamento específico para esse fim após a respetiva calibração.

2.5.5 DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA - ρ

A determinação da densidade das amostras foi realizada recorrendo à picnometria. Esta é uma técnica laboratorial utilizada para determinar massa específica e densidade de líquidos que pode, no entanto, ser adaptada para sólidos. Para a realização destes ensaios recorreu-se ao procedimento presente na ASTM D792, ISO 1183 - Density and Specific Gravity.

2.5.6 CARÊNCIA QUÍMICA DE OXIGÉNIO – CQO

A carência química de oxigénio é um método que permite quantificar a matéria orgânica numa solução através da concentração da matéria orgânica oxidada. Este método pode ser influenciado pela presença de substâncias suscetíveis de serem oxidadas e, como tal, verifica-se a necessidade de adicionar sulfato de mercúrio (HgSO_4) para minimizar estas interferências.

Para avaliação da CQO pode-se usar o procedimento 5220 B (Open Reflux Method) descrito no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th edition (1998) adaptando-o para uma amostra sólida.

2.5.7 DETERMINAÇÃO DO FREE AIR SPACE

A Porosidade, ou espaço de ar livre (FAS), é definido como a razão entre o volume de poros cheios de ar e o volume total de amostra. A existência de espaço livre na mistura é muito importante visto ser o meio de difusão do oxigénio necessário para os microrganismos realizarem as suas funções, permitindo ainda o arrefecimento da mistura, reduzindo a probabilidade de se criarem condições anaeróbias.

Este parâmetro foi determinado seguindo o procedimento utilizado por Annan (1998) que se baseia numa equação empírica.

2.5.8 DETERMINAÇÃO DA RAZÃO C/N PELA ANÁLISE ELEMENTAR

A Análise elementar foi realizada num equipamento existente nas instalações da faculdade que permite obter diretamente a percentagem de cada um dos seguintes elementos: carbono (C), enxofre (S), hidrogénio (H) e azoto (N) através da combustão dinâmica da amostra.

Neste método, são pesadas 6 mg de amostra numa cápsula de estanho e as amostras são analisadas em triplicado, para além das amostras também são pesadas 6 mg de padrão de sulfonamida. Os materiais pesados são colocados no equipamento seguindo uma ordem específica e o que ocorre no interior do mesmo é basicamente a combustão dos materiais que por sua vez libertam os gases que são transportados por corrente de hélio, separados por coluna de cromatografia gasosa (CG) e finalmente detetados por condutividade térmica (DCT).

2.5.9 DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS

A determinação dos metais pesados foi realizada recorrendo a um equipamento de espectroscopia de absorção atómica GBC 932 plus. Esta determinação foi realizada seguindo o procedimento 3110 (Metals by atomic absorption spectrometry) descrito no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition (1998).

Nesta técnica, a quantidade de radiação absorvida é uma medida quantitativa da concentração do elemento a ser analisado e para cada metal a analisar é necessário efetuar a troca para uma lâmpada correspondente (cátodo feito do elemento a ser determinado).

A amostra em causa é lançada na chama a temperaturas que variam entre 2100-2300 °C e onde os átomos da mesma são reduzidos ao estado atómico. Um feixe de radiação emitido pela lâmpada atravessa a chama e passa para um monocromador atingindo o detetor.

Os átomos livres absorvem as radiações cujos comprimentos de onda correspondem ao elemento em causa. A redução da energia de radiação no comprimento característico analítico é uma medida da quantidade de elemento nessa amostra.

Com exceção da determinação do mercúrio que foi realizada recorrendo à técnica designada gerador de hidretos, todos os restantes metais analisados pela técnica de chama de ar/acetileno.

2.5.10 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS

A análise microbiológica das amostras surgiu da necessidade de verificar quais os microrganismos dominantes em cada zona do reator e a existência ou não de perigo aquando da utilização do composto nas culturas. Neste caso optou-se por realizar como técnica a filtração por membrana para a preparação dos ensaios realizados.

Como foi referido anteriormente procedeu-se à análise da presença de Actinomicetes, Fungos, Heterotróficos, Coliformes Fecais e Enterococos. Os três primeiros foram analisados para o composto e para outras duas zonas do reator que se encontravam a diferentes temperaturas sendo que os últimos dois (Coliformes e Enterococos) apenas se realizaram para o composto.

MEMBRANA FILTRANTE

A técnica de membrana filtrante consiste em realizar para a amostra original e para as diluições efetuadas (neste caso optou-se por efetuar 7 diluições) uma filtração por vácuo, através de membranas de nitrato de celulose de diâmetro de 47 mm e com poros de 0,45 µm.

Após a colocação da membrana no funil procedeu-se à sua hidratação com um pouco de salina estéril adicionando-se posteriormente 1 ml de solução. Após a filtração, e com a ajuda de uma pinça estéril (trabalho efetuado sempre junto à chama) colocou-se a membrana virada para cima sobre o meio de cultura de uma caixa de petri. Todas as filtrações foram realizadas em duplicado para diminuir a ocorrência de erros.

MEIOS DE CULTURA

Os meios de cultura foram preparados consoante as indicações presentes nos rótulos dos próprios recipientes. O tempo de incubação variou entre 12 e 36 horas dependendo das respetivas especificações. Os meios utilizados foram os seguintes:

Actinomicetes:

Actinomycete Isolation Agar

Fungos:

PDA - Potato Dextrose ágar

Heterotróficos

PCA - Plate Count Agar

Este meio, ao contrário dos outros utilizados não se efetuou pelo método de membranas filtrantes mas pelo método de incorporação, no qual 1 ml da amostra era colocado na caixa de petri e o meio era colocado por cima ainda quente.

Coliformes Totais

Membrane Lauryl Sulphate Agar

Enterococos

SB - Slanetz and Bartley

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo inclui a análise e discussão dos diversos testes e métodos aplicados às amostras recolhidas no reator de compostagem. Para cada parâmetro serão apresentados os dados recolhidos e realizada a respetiva discussão. Tendo em conta a escassez de informação relativamente a ensaios realizados em contínuo em reatores verticais procurou-se fazer a comparação dos resultados obtidos com os ensaios realizados por Gomes (2011) num reator vertical descontínuo, visto que este foi o único trabalho encontrado, realizado com um reator vertical à escala piloto.

O trabalho realizado por esta autora foi realizado na sequência de uma dissertação para atribuição de grau Mestre na Universidade de Coimbra. Apesar das diferenças encontradas neste sistema, a maioria dos testes realizados às amostras foi semelhante e como tal servirá como modelo de comparação a nível de resultados obtidos. É importante ainda referir que não se encontrou nenhum estudo do género (nacional e internacional) que utilizasse apenas relva como material a compostar.

A instalação utilizada na Universidade de Coimbra era constituída por três reatores, com a mesma mistura mas cujos tempos de retenção do material eram diferentes. Para motivos de comparação apenas se utilizaram os resultados correspondentes ao reator 1, uma vez que neste se assumiam 20 dias para a degradação da matéria orgânica.

Os reatores utilizados possuíam uma geometria cilíndrica e tinham sido isolados termicamente do exterior através de revestimento com uma Manta Aeroflex. Possuíam também um orifício lateral de entrada de ar comprimido, distribuído através de uma placa perspex perfurada simetricamente para garantir a uniformidade da distribuição do ar comprimido. A mistura de compostagem testada nos três reatores foi constituída por palha de trigo (com elevado teor de carbono), casca de batata e aparas de relva (com elevado teor de azoto), (Gomes, 2011).

Para uma maior simplicidade de análise dividiu-se este capítulo em 5 secções distintas. A secção 1 corresponde à fase de arranque iniciada após o abastecimento total do reator; a secção 2 corresponde à fase de funcionamento em contínuo, e encontra-se subdividida em 2 cenários, o cenário 1 no qual não se procede à adição de água ao reator e o cenário 2 no qual se realiza uma adição de água de 2 em 2 dias. A secção 3 corresponde à etapa de determinação dos metais pesados, a secção 4 corresponde à análise microbiológica realizada ao material e a secção 5 inclui os resultados obtidos para o teste de crescimento aplicado ao composto após 17 dias de maturação no exterior.

3.1 ARRANQUE DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Esta etapa foi marcada essencialmente pela criação do sistema de aquisição de dados que foi anteriormente referido na instrumentação; pelo início da alimentação de material ao reator e pelo registo das temperaturas verificadas ao longo do abastecimento.

Paralelamente à elaboração do programa em Labview para aquisição de dados foi necessário providenciar a instalação e respetivas ligações dos termopares aos sistemas de aquisição. Esta etapa do trabalho revelou-se de alguma complexidade devido à existência de pouca informação nos manuais dos equipamentos em relação às

ligações necessárias para proceder à aquisição. Durante a aquisição da temperatura verificou-se a existência de alguns problemas associados ao software utilizado para recolher os dados. Esses problemas intervieram ao nível da gravação dos dados provocando a perda dos mesmos. No entanto, estes problemas foram sendo resolvidos à medida que foram sendo detetados.

Nesta fase de arranque a aquisição dos dados estava a ser realizada a cada 5 minutos; no entanto, visto que a variação da temperatura não era muito rápida, em termos de tratamento de dados adotou-se o registo correspondente a cada 60 minutos, tendo sido este o intervalo que se usou no posterior tratamento dos dados.

A colocação dos termopares realizou-se lateralmente, como já foi referido, em diferentes posições. Foram utilizados 3 termopares com comprimento de 1 metro colocados a 0,90; 1,35; 1,95 metros do local onde se efetua a recolha do material compostado. Um 4º termopar de 0,50 metros foi colocado também na posição dos 1,35 (1,35m B) para se efetuar uma comparação em termos radiais da temperatura. Estas temperaturas foram registadas do fundo do reator para o topo.

3.1.1 TEMPERATURA

Na figura 3.1 encontram-se representadas as variações de temperatura registadas após o carregamento total do compostor realizado a 9 de Maio de 2014. Nesta fase reparou-se que havia um problema associado à colocação dos termopares na horizontal como já foi referido. Como tal, devido a estas alterações nos termopares só se incluiu uma pequena quantidade de dados para esta análise inicial da evolução da temperatura após o primeiro carregamento.

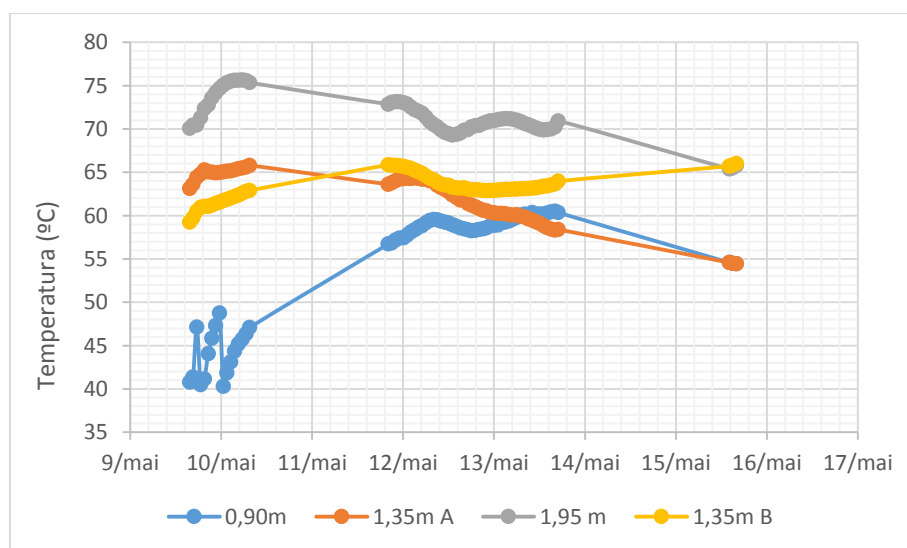


Figura 3.1 - Evolução da temperatura após carregamento completo do reator

Nesta fase é possível verificar uma grande discrepância em termos de volume de registos de temperatura que está relacionada com vários problemas relacionados com o sistema de aquisição que foram sendo resolvidos à medida que foram aparecendo.

Analisando a figura 3.1 é possível verificar que após o carregamento verifica-se o aumento da temperatura em todos os pontos de medição relacionada naturalmente com o início da atividade microbiana resultante das suas funções metabólicas. O maior aumento da temperatura corresponde ao ponto mais inferior (0,90m) que é alimentado primeiro ficando depois sob o peso das restantes camadas de relva adicionadas.

Após cerca de 4 dias verifica-se a estabilização da temperatura em todos os pontos na ordem dos 60-70 °C que corresponde a uma gama de microrganismos termófilos. Esta gama de temperaturas, considerada por Haug (1993) como a primeira fase de compostagem, permite a eliminação de odores incómodos e a destruição de agentes patogénicos e de sementes de plantas daninhas, iniciando-se também a degradação da celulose, hemicelulose e as gorduras.

No entanto, autores como Tchobanoglous et al (1993) referem que estas gamas de temperaturas correspondem a uma segunda fase de compostagem que deve ser precedida por uma gama de temperaturas inferiores a 40° C onde se dá a proliferação de bactérias e fungos mesófilos responsáveis pela degradação de açúcares, amidos, celulosas simples e aminoácidos presentes no resíduo bruto. Só após esta fase se verifica o aumento da temperatura (resultante da atividade dos microrganismos) dando lugar ao aparecimento de uma maior quantidade de organismos termófilos.

Nestes ensaios é possível verificar que apenas no ponto correspondente a uma altura de 0,90 metros se procede à adaptação dos organismos ao meio através da proliferação dos mesófilos. Provavelmente devido à quantidade de relva adicionada não se conseguiu observar o mesmo nos restantes locais, como seria de esperar visto que a alimentação efetuou-se ao mesmo tempo.

Os pontos 1,35 m A e 1,35 m B encontram-se localizados à mesma altura mas a distancias diferentes do centro como já foi referido e o seu comportamento é semelhante; no entanto, é de referir que o termopar do B, como tem um menor comprimento é mais resistente a se afundar com a matéria a compostar do que o de maior comprimento. De referir ainda que quanto mais próximo do centro maior a temperatura detetada uma vez que o metal é um excelente condutor de temperatura favorecendo o arrefecimento junto às paredes do reator.

Um outro fator a referir que condiciona estas temperaturas foi a inexistência inicial nas instalações de um rotâmetro com capacidade para se atingir as quantidades de oxigénio calculadas teoricamente. Tendo-se utilizado nesta fase um rotâmetro que permitia medir um caudal de apenas cerca de 9,44 L/min.

3.1.2 CARATERIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO

Nesta fase realizou-se a determinação da maioria dos parâmetros para caraterizar a relva. No entanto, alguns dos métodos referidos não foram aplicados à relva visto que na altura não se encontravam disponíveis para serem utilizados. Estes dados podem ser consultados na tabela 3.1

Tabela 3.1 - Parâmetros analisados para a relva

Parâmetro	Resultado
Teor de Humidade (%)	63,47
Teor matéria orgânica (%)	16,52
pH	6,59
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	548,00
Free Air Space - FAS	18,85
Massa volúmica (g/cm^3)	0,51
CQO (mg/g)	208,13
Razão C/N	12,49

O teor de humidade da relva encontra-se dentro dos valores ótimos para compostagem e como tal, perante este dado não se efetuou a rega numa fase inicial. O pH da relva encontra-se numa zona neutra. A massa volúmica da relva é inferior à obtida experimentalmente pelos alunos aquando do dimensionamento do reator ($0,70 \text{ g}/\text{cm}^3$). A razão C/N obtida é bastante inferior à existente na literatura para este tipo de resíduos que normalmente apresentam uma razão C/N próxima da razão ótima para compostagem.

3.2 FUNCIONAMENTO EM CONTÍNUO

Como foi referido nesta fase será efetuada a análise de 2 cenários distintos para os diversos parâmetros (com e sem adição de água ao compostor). Pretende-se comparar, para além do efeito da adição de água o facto de o reator estar a funcionar há mais tempo.

No caso da temperatura, serão apenas incluídos os resultados dos termopares verticais, sendo que estes foram colocados a 0,70; 0,90; 1,04 e 1,24 metros para se efetuar uma análise das temperaturas a diferentes profundidades. Estas alturas correspondem à profundidade a que os termopares se encontram mergulhados no composto. Também se efetuou uma recolha manual da temperatura utilizando um termopar de 0,50 metros sendo estas temperaturas medidas lateralmente. Em relação aos restantes parâmetros, procedeu-se à recolha de amostras em 4 pontos (composto, Zona 1, Zona 2 e Zona 3) situados a diferentes alturas do compostor. O ponto corresponde ao composto situa-se à saída do reator (apesar de não ser composto, uma vez que não está maturado atribuiu-se esta definição por motivos práticos visto ser o local onde se espera obter uma matéria mais biodegradada); a Zona 1 encontra-se a uma altura superior a este e assim sucessivamente. Muitas vezes não existia material ao nível da Zona 3 e como tal não se procedeu à sua análise nessas alturas.

3.2.1 TEMPERATURA

Na figura 3.2 estão representadas as temperaturas medidas em modo contínuo para 4 alturas diferentes no reator. O intervalo de tempo considerado foi selecionado por ser o mais representativo do funcionamento em contínuo do reator que teve que ser revolvido por duas vezes. De referir que neste intervalo de tempo se realizou a introdução de um caudal de ar de 150 L/min.

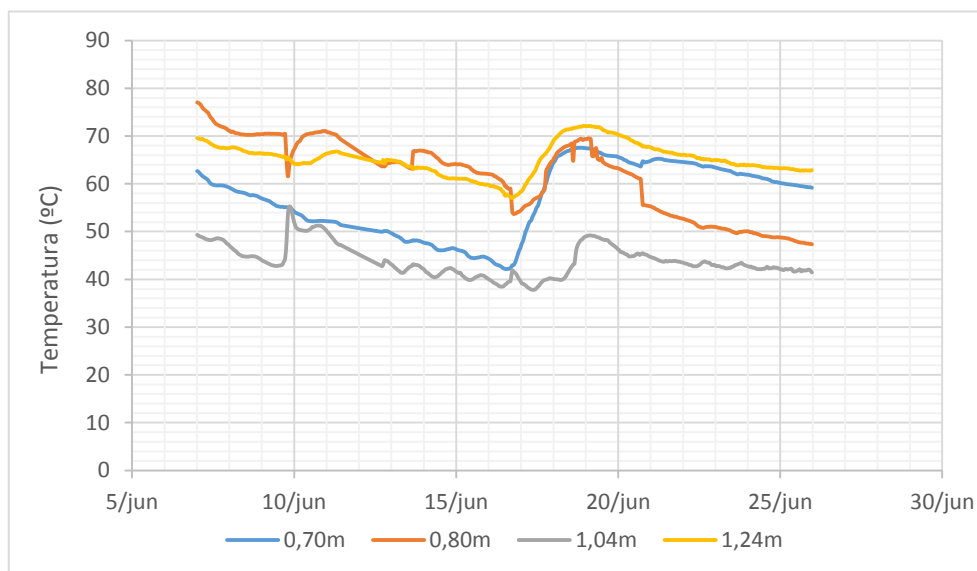


Figura 3.2 - Evolução da temperatura no reator em modo contínuo

Analisando a figura 3.2 verifica-se que o ponto correspondente aos 1,04 metros apresenta sempre os valores mais baixos de temperatura, na ordem dos 4 0°C, aparentando desta forma uma etapa mesófila na qual os microrganismos existentes proliferam a temperaturas mais baixas. Este comportamento nesta zona era previsível tendo em conta que a matéria orgânica ao entrar no reator começa a ser degradada provocando o aumento da temperatura como se pode observar entre os 0,70 e os 0,80 metros. No entanto, a dada altura a quantidade de matéria orgânica a ser degradada é menor, provocando a diminuição do metabolismo dos microrganismos e desta forma a diminuição da temperatura.

O único comportamento não concordante com a literatura nesta figura acaba por ser o correspondente aos 1,24 metros visto que não era expectável temperaturas tão altas nesta zona pelos mesmos motivos justificados para o ponto 1,04. Além disso, abaixo deste ponto (1,80 metros) as temperaturas rondavam sempre os 40-45°C (temperaturas registadas manualmente).

O comportamento discordante neste ponto estará certamente relacionado com a distribuição do ar realizada nesta mesma zona. A distribuição do ar gerou a compactação da matéria orgânica junto aos tubos de distribuição (facto comprovado após o esvaziamento do reator). Esta compactação criou uma zona anaeróbia onde a humidade era baixa o que terá provocado o aumento da temperatura registado. A existência de uma menor quantidade de espaços livres nesta zona contribui para uma menor dissipação da temperatura e consequentemente este aumento obtido.

O aumento da temperatura em todos os pontos próximo do dia 17 de junho está relacionado com um carregamento de aproximadamente 150 kg de relva efetuado nessa altura. A adição desta matéria orgânica fresca provocou um aumento da temperatura registada devido à sua rápida biodegradação.

Seguidamente será realizada uma breve discussão sobre as temperaturas registadas manualmente ao longo de um determinado período durante o cenário 1. Estas temperaturas foram recolhidas para verificar o comportamento da temperatura numa zona mais próxima das paredes (0,50 m). Inicialmente foram recolhidas temperaturas a 0,20 m da parede mas estes dados acabaram por ser excluídos devido à elevada influência do exterior nos mesmos. Na figura 3.3 encontram-se um conjunto de dados recolhidos para um dia aleatório nas 2 alturas consideradas (1,18 e 1,80 metros medidos partir da zona superior). Tentou-se realizar a medição para mais alturas; no entanto, no período selecionado a quantidade de relva não era suficiente para fazer uma correta medição das mesmas. Em cada altura procedeu-se à medição em 5 locais diferentes.

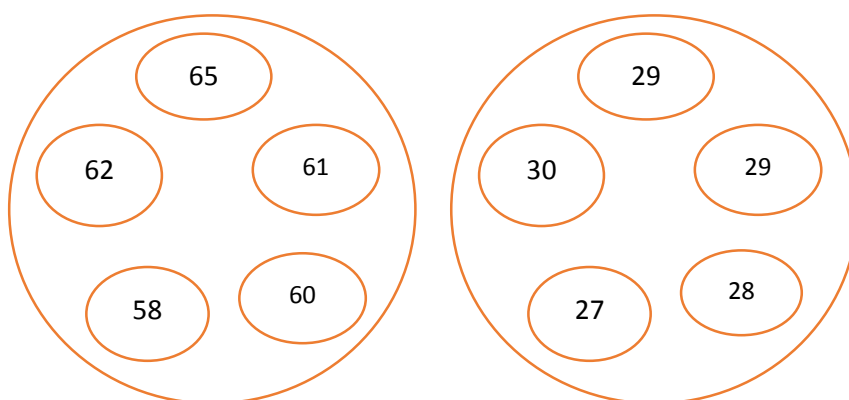


Figura 3.3 - Valores obtidos em °C para um determinado dia para as duas alturas consideradas na análise (1,18 e 1,80 m respetivamente)

Após a análise desta figura é possível concluir que a variação não é muito significativa ao longo dos 5 pontos para a mesma altura de recolha por isso optou-se por fazer a média destes 5 pontos para cada altura, permitindo a criação a figura 3.4:

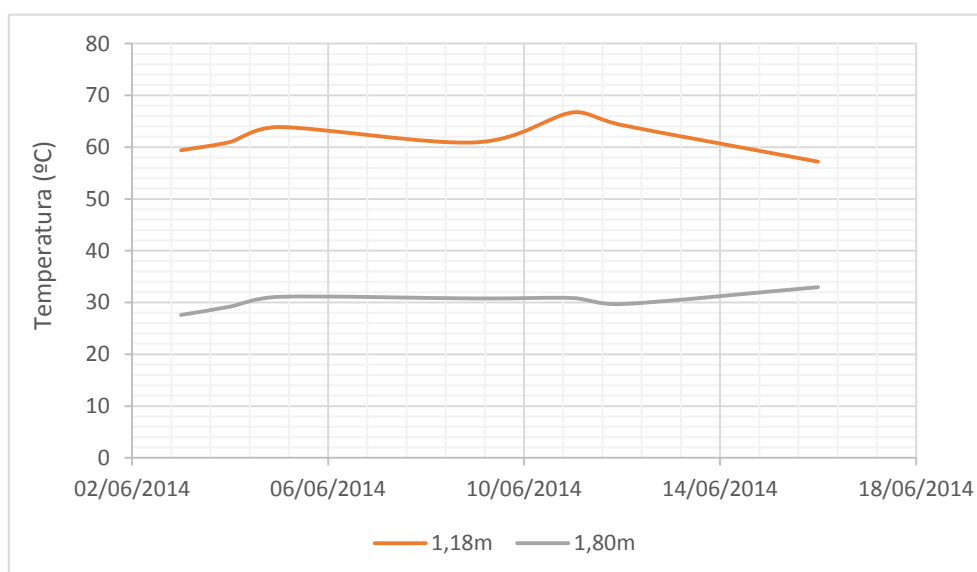


Figura 3.4 - Temperaturas medidas manualmente ao longo de um determinado período de tempo

Na figura 3.5 encontra-se a representada a variação da temperatura para um período de tempo onde a adição de água é realizada de 2 em dois dias de forma a contrariar a secagem no centro relacionada com os gradientes de distribuição de ar que se formaram.

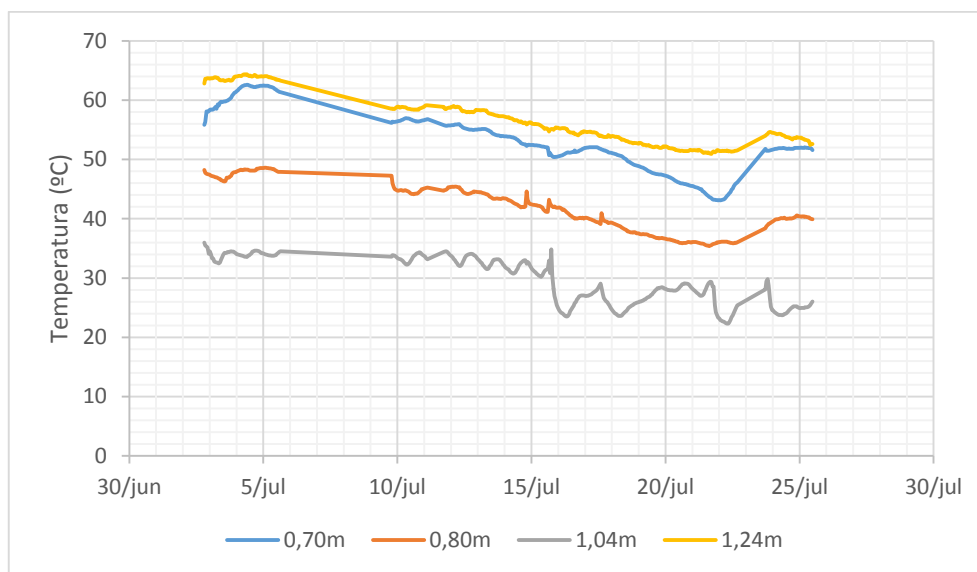


Figura 3.5 - Evolução da temperatura no reator em modo contínuo – Cenário II

Analisando a figura 3.5 é perceptível uma maior identidade para cada um dos pontos uma vez que não existe cruzamento de temperaturas nem sobreposição das mesmas. De referir que para além do fator água existe um fator tempo que se traduz numa maior estabilização das zonas do reator.

Neste cenário, a profundidade de 1,04 metros voltou a registar as temperaturas mais baixas, assumindo que nessa altura a inserção de ar fresco era realizada corretamente permitindo baixar a temperatura localmente. Novamente registou-se para a profundidade de 1,24 metros uma gama de temperaturas muito superior às expectáveis tendo em conta a localização deste mesmo ponto. No entanto podemos aferir que apesar da rega contrariar a secagem sentida no centro do reator a camada compacta que se criou à volta do tubo de introdução de ar continua a impedir a passagem de oxigénio nesta zona criando uma zona anaeróbia cuja temperatura aumenta devido a não existir a passagem de ar ou lixiviado.

Da profundidade de 0,70 para 0,80 metros esperava-se um aumento da temperatura uma vez que é nesta zona que se inicia a degradação da matéria orgânica no entanto aconteceu o oposto. Também seria de esperar umas temperaturas um pouco mais baixas do que as alcançadas, visto não se identificar a transição do meio mesófilo para termófilo. No entanto, esta transição pode ter ocorrido numa profundidade inferior aos 0,70 m que tendo em conta a disposição dos termopares não foi identificada.

Analisando comparativamente, a adição de água teve alguma influência ao nível de gamas de temperaturas alcançadas permitindo uma maior facilidade de distinção do comportamento a diferentes alturas.

Nos ensaios realizados por Gomes (2011) conseguem-se identificar ao longo do reator os diferentes comportamentos descritos na literatura para o processo de compostagem. As temperaturas vão aumentando gradualmente até atingirem um máximo na zona dos termófilos, ocorrendo posteriormente a redução da mesma ao longo dos 20 dias de ensaio.

3.2.2 TEOR DE HUMIDADE – H (%)

No capítulo 1 encontra-se referida a importância de garantir uma humidade que se situe entre os 60-70% visto que este é o valor ótimo considerado por Tchobanoglous et al (1993). O teor de humidade corresponde então à água livre presente nos resíduos a compostar e é fortemente influenciado pelas propriedades intrínsecas dos resíduos.

Estes valores de humidade são no entanto muito dependentes do tipo de material a compostar, no caso de materiais como a serradura e a palha os valores ótimos situam-se entre 75 a 90% de humidade, por outro lado, a relva fresca acabada de cortar necessita de um teor de água menor, entre de 50 a 60%, (Batista J.G.F. & Batista E.R.B., 2007).

Este teste foi realizado às várias amostras recolhidas e os resultados podem ser visualizados na figura 3.6:

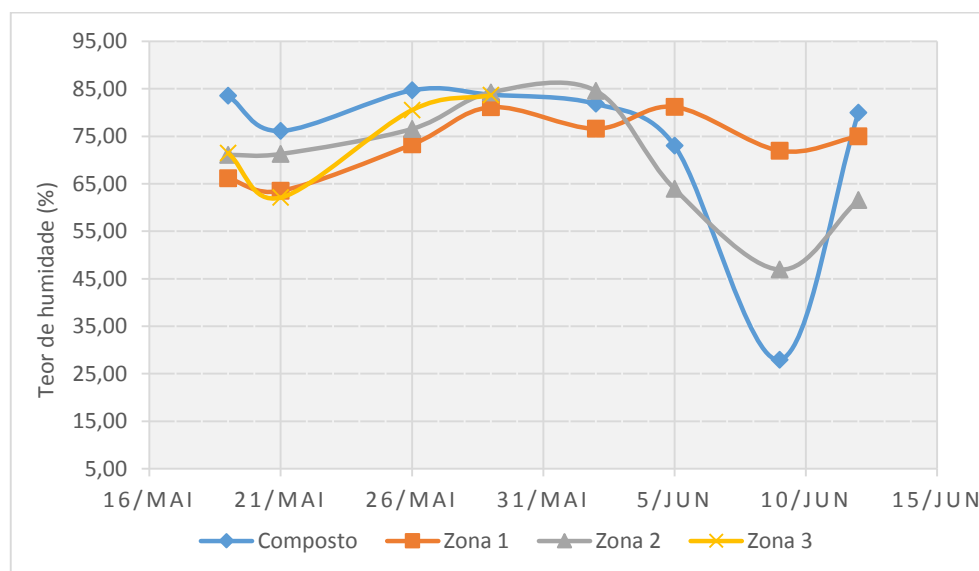


Figura 3.6 - Variação da % de humidade ao longo dos 4 pontos de amostragem

Analisando a figura 3.6 verifica-se que o comportamento dos 4 locais de análise é bastante semelhante não apresentando diferenças significativas em termos de gamas de humidade. Fazendo uma análise geral ao período de tempo entre 16 de maio e 5 de junho verifica-se que as gamas obtidas são um pouco superiores às gamas de humidade ótimas referidas na literatura para a compostagem da relva.

O teor de humidade de 60%, considerado “máximo admissível”, ou seja, é o valor de humidade para o qual não se desenvolvem condições de anaerobiose permitindo que o processo ocorra satisfatoriamente sem que ocorra a asfixia dos microrganismos presentes, (Fernandes, 2012). Nos nossos ensaios, este valor foi claramente ultrapassado como seria de esperar visto que nestes ensaios apenas se utilizou relva como material a compostar e a humidade da própria

relva é muito elevada. Naturalmente que estes valores seriam facilmente controlados com a adição de material com menor teor de humidade ao compostor.

De referir que no dia 23 de maio procedeu-se à mudança dos termopares da horizontal para a vertical o que provocou um certo revolvimento da mistura que provocou um aumento da gama de humidade obtida nos diversos pontos.

No dia 2 de junho surgiu a necessidade de efetuar novo revolvimento face à dificuldade em se remover composto do reator. Como o material não estava a abater optou-se por realizar um revolvimento a fim de tentar a sua descida. Este revolvimento foi mais intenso do que o anterior e é responsável pela descida acentuada que ocorreu entre 5 e 15 de junho.

O revolvimento do material traduz-se numa redistribuição da humidade, minimizando-se os fluxos preferenciais de ar conduzindo a uma degradação mais homogénea. No entanto, como este sistema foi projetado para trabalhar em modo estacionário e o revolvimento interferiu nos objetivos pretendidos, mas esta foi a opção possível para o problema que entretanto surgiu.

A zona 1 é particularmente a zona que apresenta sempre uma menor % de Humidade que estará essencialmente relacionada com o facto de ser a zona onde se encontra instalado o tubo difusor do ar comprimido, e provoca uma secagem maior da zona devido às quantidades de ar elevadas. A evaporação da água ao longo do processo tende a provocar a redução da humidade que pode ser controlada por diversos dispositivos.

Os resultados obtidos por Gomes (2011) apresentam ao longo dos 20 dias de ensaio sempre valores de humidade superiores a 60% tendo ocorrido provavelmente o preenchimento dos espaços vazios dificultando a passagem de oxigénio. Na figura 3.7 encontra-se a representação dos valores de humidade obtidos para as 4 recolhas realizadas nos pontos de amostragem para o cenário II.

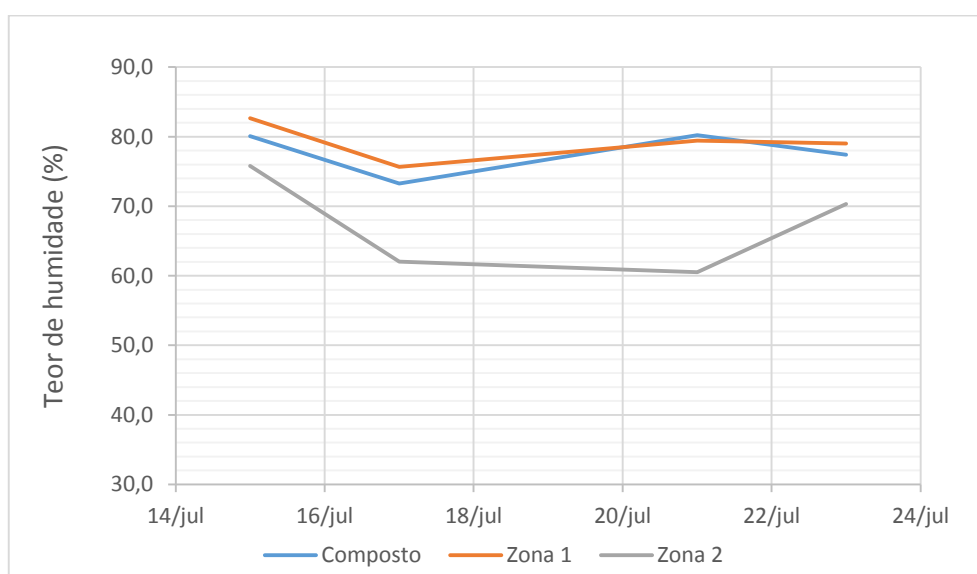


Figura 3.7 - Variação da % de humidade ao longo do tempo – Cenário II

A figura 3.7 permite aferir que neste intervalo de tempo se registou uma diminuição das gamas detetadas para o teor de humidade. Esta diminuição significa que mesmo com a introdução de água não se verificou a subida do teor para valores muito elevados uma vez que a adição foi realizada essencialmente no centro e as amostras foram recolhidas de zonas mais afastadas do mesmo por causa das dificuldades associadas ao equipamento.

O teor de humidade na posição da Zona 1 e do Composto é muito semelhante e é fortemente afetada pelo sistema de distribuição do ar que, como já foi referido, criou uma zona compacta à sua volta que obrigava a uma distribuição menos uniforme do ar e da água adicionada. Como a água não penetrou nesta camada dirigiu-se para as laterais permitindo a justificação deste resultado. Na zona 2 o teor de humidade acaba por ser menor uma vez que estarem contacto direto com a atmosfera e como tal as trocas de humidade são mais intensas, para além disso a água direciona-se para o fundo do reator.

3.2.3 TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA – MO (%)

O teor de matéria orgânica refere-se, neste contexto, à quantidade de matéria orgânica que ainda pode ser degradada num determinado resíduo. Na natureza, a degradação da matéria orgânica é considerada compostagem natural. Na figura 3.8 encontram-se os valores obtidos para este parâmetro.

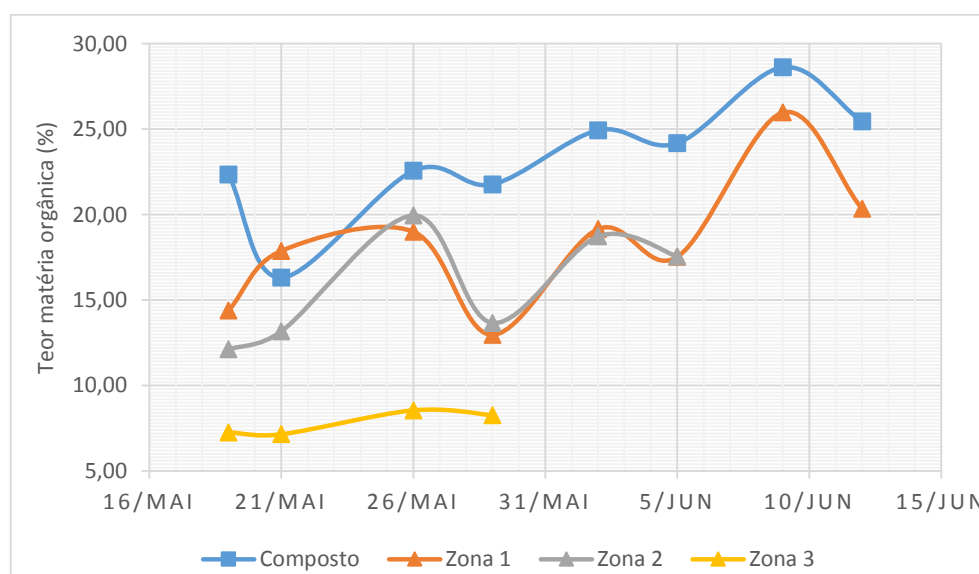


Figura 3.8 - Variação do teor de matéria orgânica ao longo dos 4 pontos de amostragem

Os dados obtidos para este parâmetro revelam-se bastante confusos uma vez que ocorreu exatamente o contrário do que era expectável. Tendo em conta o posicionamento dos pontos de amostragem, na zona 3, que corresponde à zona de carga dos resíduos verifica-se um teor de matéria orgânica muito baixo, o que não faz sentido tendo em conta que a compostagem pretende fazer a degradação da mesma e não o aumento. Novamente a posição correspondente ao composto, que é que corresponde ao local onde se efetua a remoção do material degradado após os 20 dias apresenta um teor de matéria orgânica praticamente superior a todos os locais do reator.

Segundo a “Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto”, um composto utilizado para a agricultura deve apresentar um teor de matéria orgânica inferior a 40%, neste caso, apesar do comportamento não concordante.

Nos testes realizados por Gomes (2011) a mistura utilizada apresentava um teor de matéria orgânica muito elevado (88%) no entanto ao longo dos 20 dias de ensaio conseguiram uma redução para 80% não atingindo o patamar anteriormente referido.

Na figura 3.9 encontra-se a representação dos valores de matéria orgânica obtidos para as 4 recolhas realizadas nos pontos de amostragem para o cenário II.

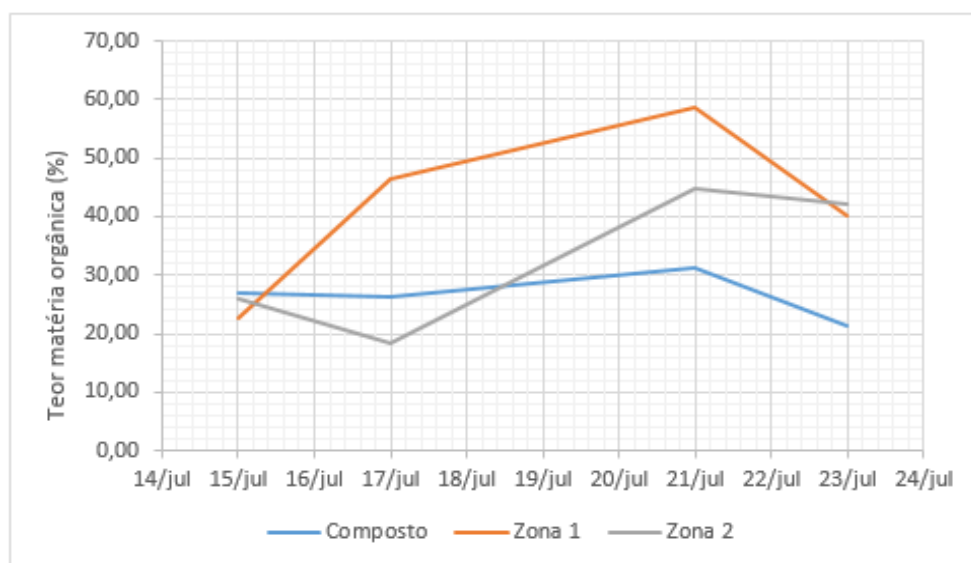


Figura 3.9 - Variação do teor de matéria orgânica – Cenário II

A figura 3.9 volta a indicar um comportamento não expectável deste parâmetro uma vez que a zona 1 situada abaixo da zona 2 apresenta uma maior quantidade de matéria orgânica. Novamente, tendo em conta que se assumiu um regime contínuo este não era o resultado esperado. Verificam-se no entanto nestas duas zonas um aumento gradual da matéria orgânica que não está relacionada com a adição de relva e nem com a adição de água. A zona do composto assumiu um comportamento constante ao longo do período tendo sempre ficado abaixo dos 40%.

3.2.4 pH

Apesar de alguns autores como Cordeiro (2010) afirmarem que este parâmetro não afeta muito o processo de compostagem visto o largo espectro de microrganismos que se pode desenvolver, surge a necessidade de se efetuar um controlo do mesmo para verificar se as condições ótimas são realmente atingidas com a intenção de favorecer o crescimento das espécies de microrganismos pretendidas. Na figura 3.10 encontra-se a representação dos valores de pH obtidos para os respetivos pontos de amostragem para o cenário I.

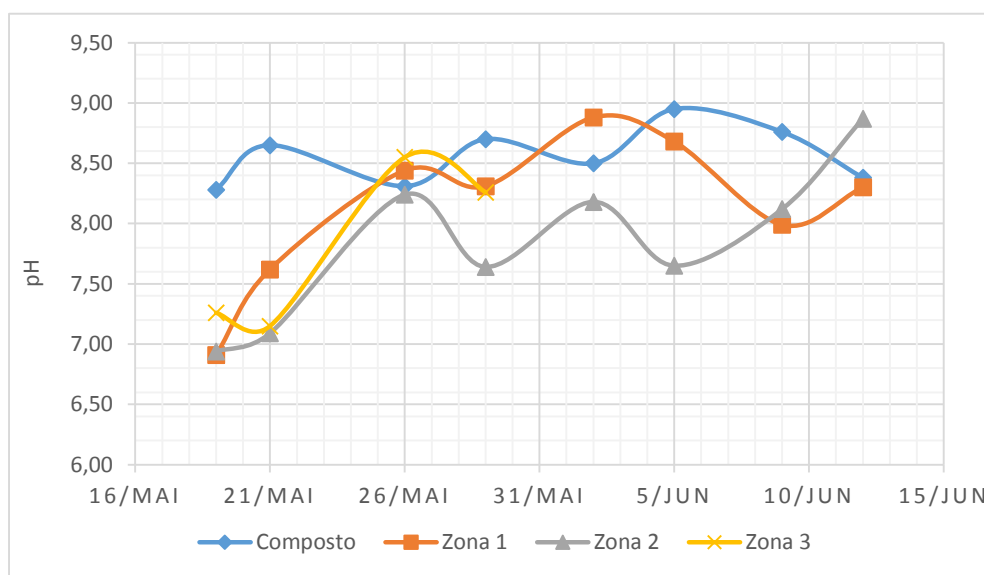


Figura 3.10 - Variação do pH ao longo dos 4 pontos de amostragem

Os valores de pH obtidos para o ponto correspondente ao composto, ao longo do intervalo de tempo seleccionado demonstram um comportamento constante rondando um valor de pH próximo de 8. Tendo em conta a informação encontrada na literatura este é um valor de pH expectável visto que nesta fase do processo o pH inicia a sua estabilização. A fase correspondente ao composto é uma fase final, anterior à maturação do material, na qual o amoníaco produzido anteriormente ao longo do processo diminuí por ação das bactérias e dos microrganismos presentes. Em relação aos restantes 3 pontos de amostragem verifica-se uma ligeira variação entre as gamas obtidas no primeiro dia e nos restantes. Esta subida de pH coincide com um carregamento de relva fresca que provocou um ligeiro aumento da gama de pH, é importante referir que outros carregamentos foram efetuados posteriormente mas não causaram este tipo de interferências. A zona 1 apresenta gamas de pH entre 8 e 9 se excluirmos a situação dos primeiros dias de recolha, relacionadas com a estabilização do pH que anteriormente foi referida.

Tendo em conta a posição do local de recolha da amostra 1 e da amostra 2 seria expectável um registo de pH na amostra 1 inferiores aos registados na zona 2, visto que numa fase inicial predomina a acidificação do meio seguindo-se um aumento do pH devido à produção de azoto amoniacal. Apesar de apenas se terem conseguido registado 4 valores para a Zona 3 este comportamento não foi detetado pela amostragem. Esta incoerência dos resultados em relação à informação presente na literatura pode ser explicado pela localização dos pontos de amostragem ao longo do reator que impossibilitaram certamente a deteção desta variação no pH.

Os resultados obtidos por Gomes, (2011) ao fim dos 20 dias de ensaio realizados obtiveram valores de pH próximos de 9,5, valores bastante próximos dos que foram atingidos pela instalação inicial na posição correspondente ao fim do processo (Composto). No entanto, tendo em conta o intervalo de pH ótimo definido na literatura verifica-se que os valores obtidos para estes testes são concordantes.

Na figura 3.11 encontra-se a representação dos valores de pH obtidos para as 4 recolhas realizadas nos pontos de amostragem para o cenário II.

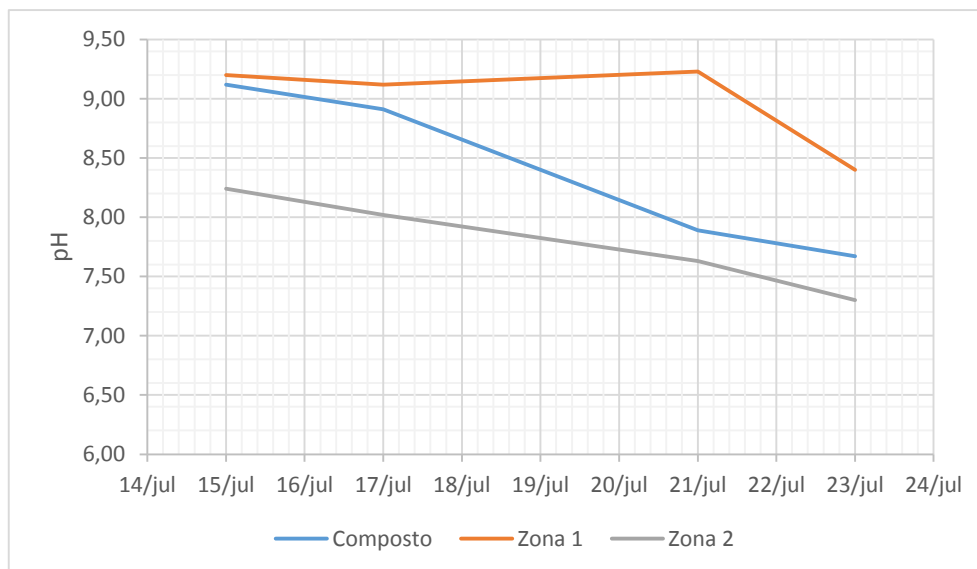


Figura 3.11 - Variação do pH – Cenário II

Apesar de terem sido realizadas menos medições para este cenário verifica-se que há uma maior estabilidade dos resultados comparativamente com o cenário 1 relacionado provavelmente com uma estabilização do funcionamento no reator que até então pode não ter sido corretamente atingida.

A zona mais superior (zona 2) apresenta um pH inferior à zona 1 indo de encontro à informação presente na literatura que considera que a 1ª etapa é caracterizada pela acidificação que provoca uma redução do pH como foi comprovado. A zona correspondente ao composto tem um pH inferior à zona 1 estando relacionado com uma etapa de maturação como já foi referido na discussão do cenário 1.

3.2.5 CONDUTIVIDADE

A condutividade elétrica é um parâmetro que está relacionado com a concentração de iões em solução, apesar de não fornecer informação quanto ao tipo de sais presentes na solução (Santos, 2007). Na figura 3.12 pode ser observada a evolução deste parâmetro ao longo do intervalo selecionado para o cenário I.

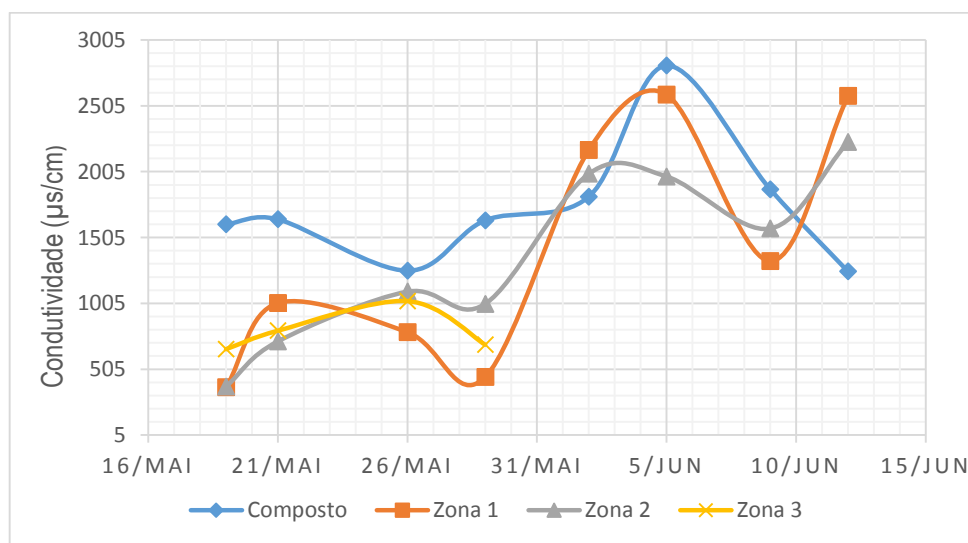


Figura 3.12 - Variação da condutividade elétrica ao longo dos 4 pontos de amostragem

O comportamento obtido ao longo do período de amostragem é muito semelhante nas 4 posições de recolha sendo que as oscilações verificadas em termos de subidas e descidas estão relacionadas com os carregamentos de relva no reator. Os carregamentos efetuados provocaram um aumento das condutividades nas 4 posições o que se traduz num aumento da concentração de sais na mistura.

O ponto de amostragem correspondente ao composto apresenta praticamente ao longo de todo o período uma condutividade superior aos restantes, facto que se encontra dentro do esperado tendo em conta a informação presente na literatura. Segundo Cordeiro (2010) o processo tende a aumentar a condutividade ao longo do tempo, resultado da mineralização parcial da matéria orgânica que por sua vez aumenta o teor de sais na matriz de compostagem traduzindo-se na obtenção de maiores valores de condutividades na posição correspondente à última etapa de decomposição.

Nas experiências realizadas por Gomes (2011) a gama de valores de condutividade obtida é bastante inferior às atingidas nos nossos ensaios (nunca excedem os 1000 $\mu\text{s/cm}$); no entanto, esta diferença de gamas está naturalmente relacionada com os diferentes materiais utilizados nos ensaios que têm na sua constituição quantidades diferentes de iões. No entanto, é importante referir que nos ensaios realizados na nossa instalação não se consegue evidenciar o aumento da condutividade ao longo da decomposição da matéria (apenas se consegue fazer a distinção na zona da amostragem final), uma vez que as gamas são muito próximas umas das outras ao contrário do que acontece nos dados recolhidos por Gomes, 2011.

Na figura 3.13 encontra-se a representação dos valores de condutividade obtidos cenário II.

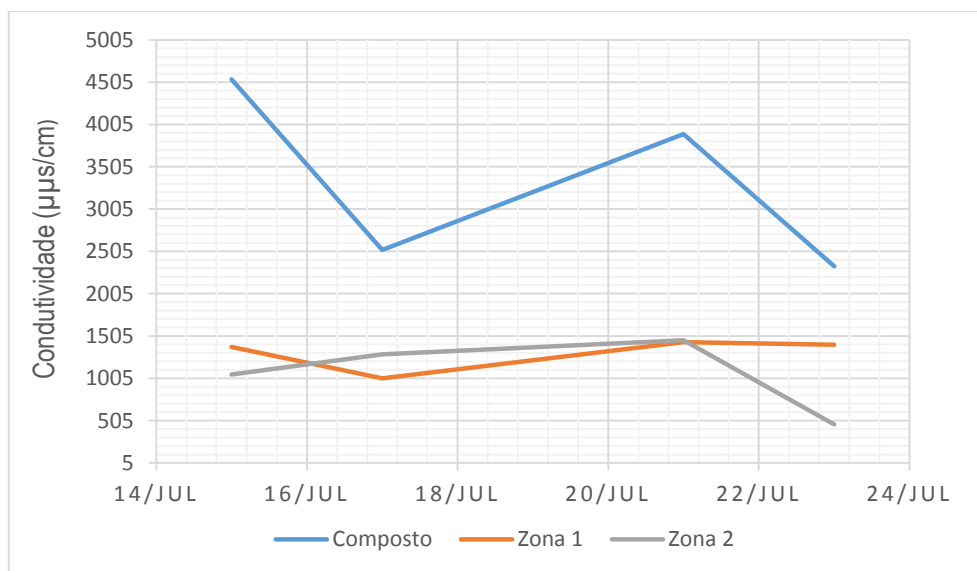


Figura 3.13 - Variação da condutividade elétrica – Cenário II

Novamente verifica-se uma maior estabilidade em termos de resultados para o Cenário II verificando-se também que a condutividade associada à zona do composto é bastante superior aos restantes atingindo valores superiores aos atingidos no cenário I. A zona 1 e 2 apresentam valores muito semelhantes não se verificando grandes variações ao nível dos iões presentes em solução.

3.2.6 FREE AIR SPACE E MASSA VOLÚMICA

Estes dois parâmetros estão interligados visto que o aumento do Free Air Space – FAS pressupõe uma diminuição da compactação do material e consequentemente uma diminuição da densidade do mesmo. No entanto, não é tão direta como seria expectável num reator de fluxo vertical com funcionamento contínuo devido à interferência da compactação originada por carregamento de novo material a compostar, e os espaços criados pela fluidização da relva aquando da introdução do ar comprimido. As variações destes dois parâmetros podem ser consultados nas figuras 3.14 e 3.15, respetivamente.

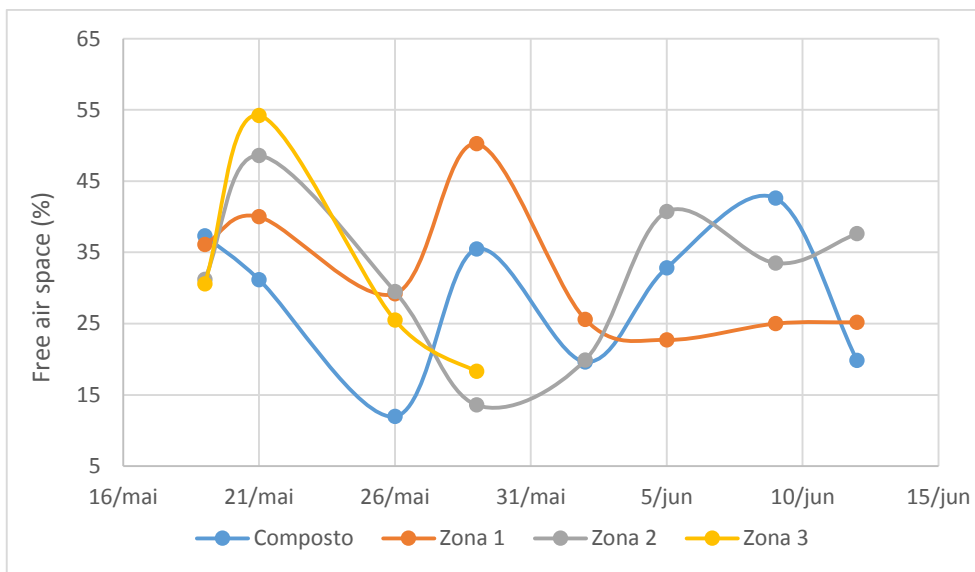


Figura 3.14 - Variação do Free Air Space ao longo dos 4 pontos de amostragem

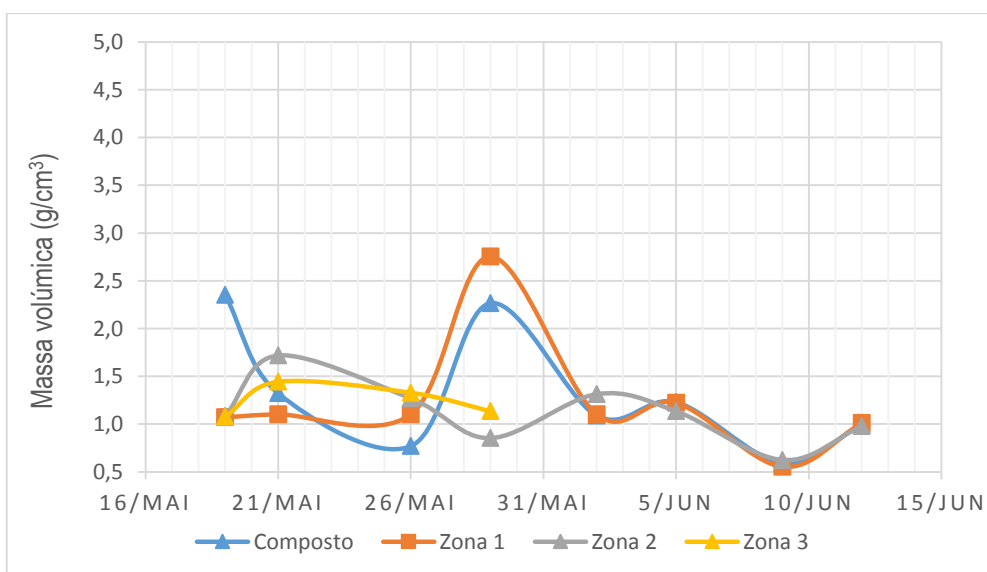


Figura 3.15 - Variação da massa volúmica ao longo dos 4 pontos de amostragem

Em relação à massa volúmica não se conseguem observar diferenças significativas ao longo das diferentes alturas, no entanto, a gama de valores obtidos apresenta um grande intervalo (0,5 e 3 g/cm³). As variações mais significativas a nível de comportamento estão relacionadas com o carregamento do reator, verificando-se um aumento da massa volúmica após cada carregamento realizado.

O Free Air Space apresenta uma gama de valores compreendidos entre 15 e 55% para todas as zonas de recolha e novamente as principais variações em termos de comportamento estão relacionadas com o carregamento de novo material. O material adicionado ao compostor encontrava-se bastante fresco o que se traduz numa menor compactação e maior quantidade de espaços livres o que confirma os resultados obtidos para este parâmetro.

Gomes (2011) obteve, no entanto, valores de Air Space relativamente superiores às gamas obtidas nestes ensaios uma vez que a gama obtida variou entre 65 e 80 %. Este parâmetro revela-se de grande importância visto que são necessários espaços para a circulação de oxigénio e água necessários à sobrevivência dos seres vivos.

Segundo Berthe et al. (2007) os valores ótimos para o Free Air Space situam-se entre 41 - 70 % podendo desta forma afirmar-se que este devia ser um dos parâmetros que devia ter sido controlado visto que se encontra afastado da zona ótima. Uma forma de atingir o intervalo ótimo seria a introdução no reator de outro tipo de mistura que incluísse material estruturante que permitisse a criação de mais espaços livres.

Em relação à massa volúmica ou densidade de bulk os valores presentes na literatura sugerem gamas entre 0,182 g/cm³ – 0,918 g/cm³ (Richard et al., 2004). Os valores obtidos excederem algumas vezes este intervalo e como tal verifica-se a importância de se efetuar um controlo do mesmo.

Para o cenário II os valores obtidos para o FAS e para a massa volúmica foram muito semelhantes aos obtidos para o cenário I, bem como as gamas atingidas e por esta forma optou-se por excluir os mesmos da sua representação na presente secção.

3.2.7 CARÊNCIA QUÍMICA DE OXIGÉNIO

Inicialmente este parâmetro foi analisado a par da carência bioquímica de oxigénio ao fim de 5 dias com o intuito de se analisar a biodegradabilidade.

No entanto os resultados obtidos para o CBO₅ apresentavam valores muito elevado e que não eram concordantes com os resultados associados a este método. Por esta mesma razão, optou-se por realizar a exclusão dos mesmos desta dissertação. Na figura 3.16 encontra-se a representação dos dados obtidos para a carência química de oxigénio (CQO).

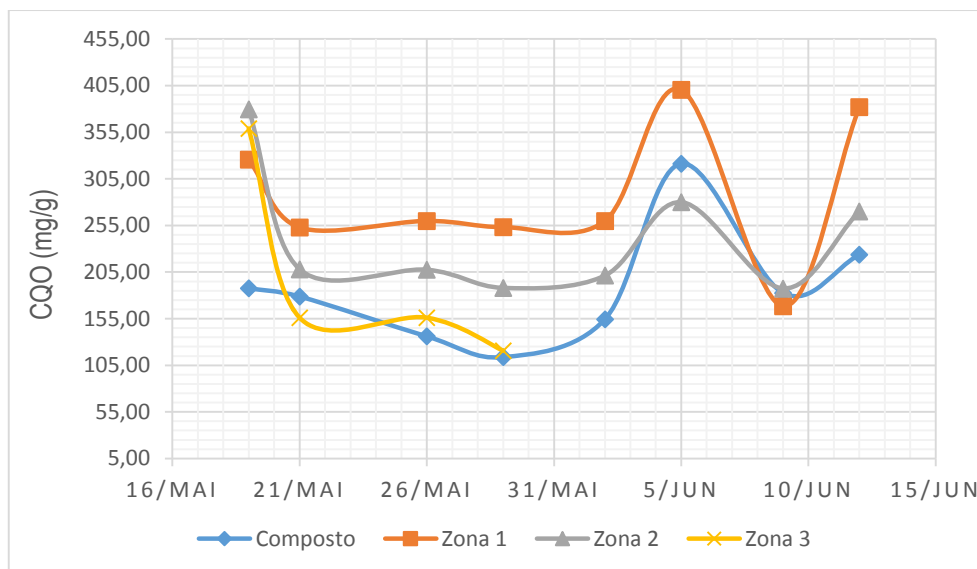


Figura 3.16 - Variação da CQO ao longo dos 4 pontos de amostragem

A CQO é um parâmetro que está diretamente relacionado com o teor de matéria orgânica, uma vez que representa a quantidade de oxigênio necessária para efetuar a degradação do mesmo.

O composto apresenta quase sempre os menores valores de CQO o que era expectável tendo em conta que as suas necessidades para a degradação são menores visto que nesta etapa a matéria biodegradável já se encontra praticamente degradada.

No entanto, seria expectável um outro comportamento para as restantes zonas tendo em conta que seria de esperar uma redução da matéria orgânica ao longo do reator e como tal uma redução das necessidades ao longo do mesmo. Neste cenário obteve-se um comportamento inverso ao esperado apresentando menores necessidades nos locais que deveriam apresentar uma maior quantidade de matéria orgânica.

Na figura 3.17 encontra-se a representação dos valores de CQO obtidos para o cenário II.

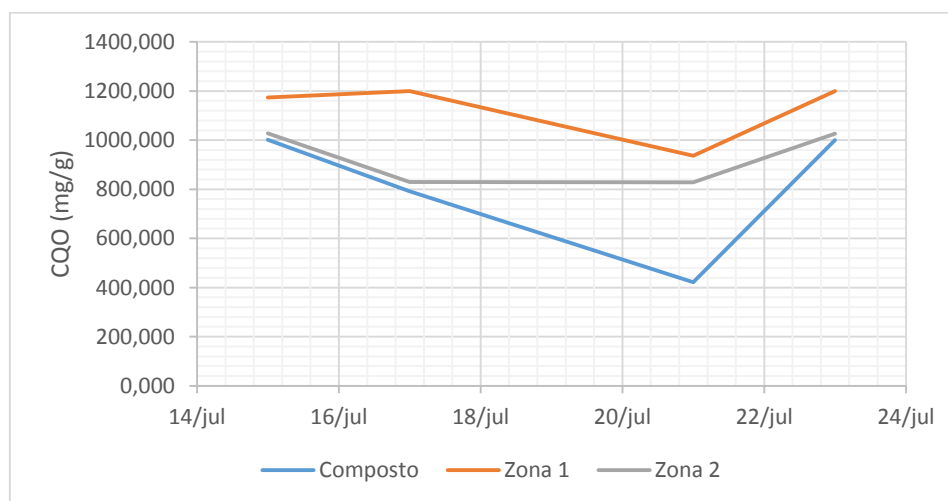


Figura 3.17 - Variação do CQO – Cenário II

O comportamento obtido no cenário II revela-se semelhante ao obtido no cenário 1 uma vez que o composto volta a ser o que apresenta menores valores de CQO e a relação entre a zona 1 e a zona 2 é semelhante à anteriormente descrita, apesar de neste cenário os valores serem mais coincidentes.

A carência química de oxigênio atingiu valores muito superiores aos atingidos no cenário I. Esta maior necessidade pode estar relacionada com o fornecimento de um substrato com maior teor de matéria orgânica. A recolha de relva foi efetuada em locais bastante distintos e que provavelmente apresentavam também características bastante distintas.

3.2.8 RAZÃO CARBONO/AZOTO

Este é um dos parâmetros mais importantes para o sucesso da compostagem. O intervalo ótimo desta razão varia consoante os autores, no entanto, segundo como Tchobanoglous et al (1993) a razão ótima varia entre 30:1 e 50:1. Segundo a informação presente na literatura, a relva fresca, acabada de cortar apresenta uma razão C/N de 20:1 o que segundo alguns autores como Cardenas et al (1980) é um valor aceitável. Na figura 3.18 encontram-se os valores obtidos para as 4 análises realizadas para o cenário 1.

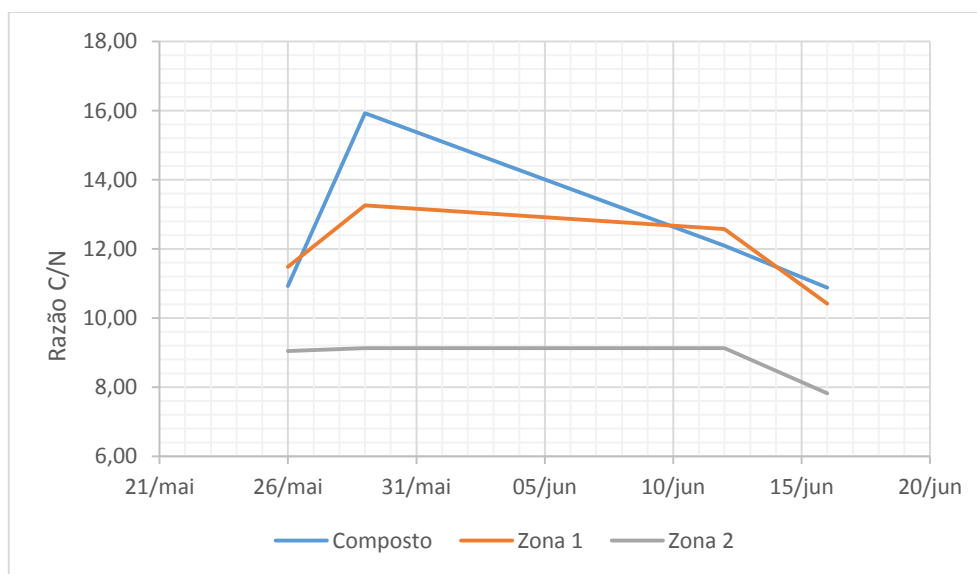


Figura 3.18 - Valores de Carbono/azoto obtidos para as diferentes amostras

Analisando a figura 3.19 é perceptível que o reator está a funcionar uma razão C/N muito baixa o que colocou em risco o sucesso da mesma. Na literatura consultada, o valor de C/N para a relva fresca apresenta-se como 21 segundo Tchobanoglous et al (1993); no entanto, os valores apresentados pela relva usada neste trabalho foram muito inferiores a este valor.

Naturalmente este parâmetro é facilmente controlado pela adição de material com maior teor em carbono até se atingir uma mistura próxima da razão ótima. No entanto, como esta correção não foi efetuada o processo de compostagem foi realizado em condições bastante longe das ideais que obrigaram os microrganismos a se adaptar a um ambiente

mais hostil. Esta adaptação implica naturalmente que a degradação seja menos eficiente e consequentemente a eficiência da compostagem ficou bastante comprometida.

Para além do reator se encontrar a funcionar abaixo dos valores ideais em termos comparativos, seria expectável uma redução da razão C/N ao longo do reator relacionada com a fixação do azoto na matéria final. No entanto os valores para o composto acabam por ser dos superiores.

Teoricamente, os valores obtidos para o composto são os corretos tendo em conta que o consumo de carbono é superior ao consumo de azoto ao longo do processo, apesar de não se ter conseguido evidenciar esse comportamento ao longo do reator de compostagem.

Na figura 3.19 podem ser consultados os valores de carbono/azoto obtidos para o Cenário II.

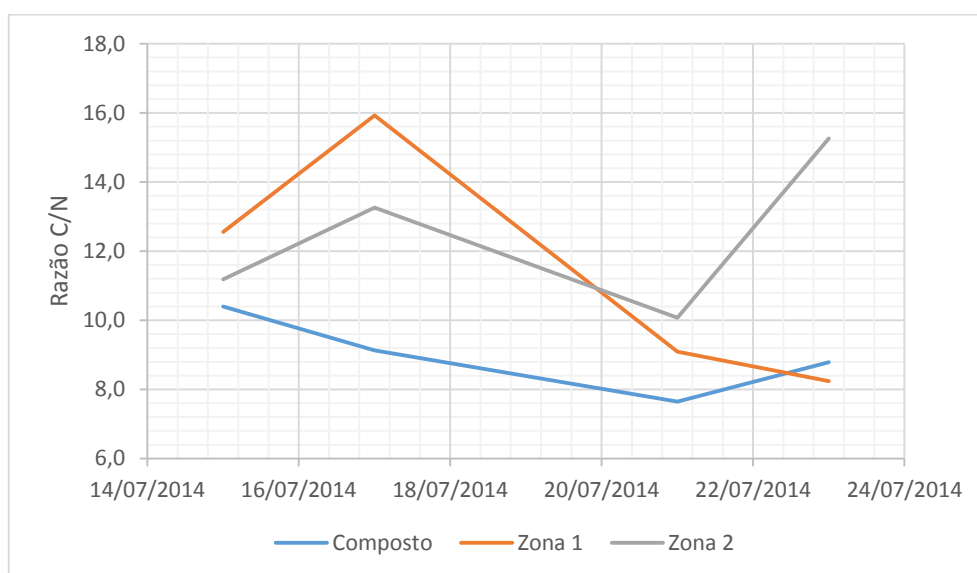


Figura 3.19 - Valores de Carbono/azoto obtidos para as diferentes amostras – Cenário II

Analisando a figura 3.19 verifica-se que a gama de valores obtidos mantém-se semelhante para os valores obtidos para o cenário I o que seria expectável tendo em conta que não houve nenhuma alteração relativamente à matéria-prima adicionada ao reator.

Neste conjunto de dados é no entanto possível verificar que o composto apresenta na maioria do intervalo dos ensaios uma razão C/N inferior às restantes posições analisadas permitindo concluir que o carbono foi utilizado pelos microrganismos como fonte de energia para as suas atividades metabólicas.

No entanto, apesar destes resultados obtidos para o composto, verifica-se que ao longo do reator ocorre um aumento da razão C/N visto que a Zona 2 (mais superficial) apresenta um conjunto de valores inferiores à zona 1 (excetuando os últimos resultados analisados).

Este comportamento estará certamente relacionado com a utilização de uma matéria-prima com uma razão C/N inferior à ótima visto que ocorre mais facilmente a perda de azoto (devido à sua disponibilidade) ao contrário do carbono (que se encontra numa forma complexa de difícil biodegradabilidade) provocando um aumento da razão C/N.

A razão C/N muito baixa provoca a perda de azoto através da volatilização da amónia, uma vez que o carbono ainda se encontra indisponível, ao contrário do azoto.

Nos últimos dados analisados verificou-se a inversão deste comportamento, apresentando-se uma razão C/N mais elevada para a Zona 2. Este comportamento poderá estar relacionada com o carregamento efetuado que permitiu a introdução de matéria biodegradável fresca com uma razão C/N mais elevada.

No anexo IV do presente relatório podem ser consultadas as tabelas relativamente à % de carbono e azoto obtidas que permitem perceber melhor o porquê de uma razão tão baixa.

3.3 DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS

Não existe na União Europeia uma norma de qualidade para compostos; no entanto, existem parâmetros, como é o caso dos metais pesados, cuja presença deve ser analisada. Até ao momento, não existe em Portugal regulamentação específica para avaliar este parâmetro, verificando-se também que nos países cuja regulamentação existe não se verifica a uniformidade da mesma, (Cunha e Queda, 2006).

Em 2001 foi apresentado um documento de trabalho “Draft of Biological Treatment of Biowaste – Working Document” (DG Env.A.2., 2001), no qual são propostos limites para concentrações de metais pesados e apesar de em Portugal não existir regulamentação específica, foi apresentado também em 2001 uma proposta de regulamentação sobre qualidade de composto para utilização na agricultura pelo LQARS/INIAP (Gonçalves e Batista, 2001) na qual são representados limites tanto para os metais pesados como para os microrganismos patogénicos.

Ainda no seguimento da regulamentação em Portugal, em 2004 foi elaborada uma “Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto” baseada nas duas regulamentações anteriormente mencionadas, que visa classificar o composto sobre a forma de classes de qualidade, com critérios fixados para a sua utilização e restrições para evitar efeitos indesejáveis para o solo, água, plantas, animais e seres humanos. Esta proposta inclui também os resíduos que podem ser utilizados para a produção de composto, (Gonçalves e Baptista, 2005).

Na tabela 3.2 encontram-se as concentrações de metais (reportados à matéria seca) obtidos para uma amostra de material compostado, com um tempo de residência no reator vertical de 20 dias. Para além das concentrações obtidas encontram-se descritos os limites de deteção do equipamento utilizado para os cálculos e a nível comparativo, os limites propostos na Draft of Biological Treatment of Biowaste – Working Document - DG Env. A.2., 2001 e Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto - Gonçalves e Baptista, 2005.

Tabela 3.2 - Valores registados para uma amostra de material após 20 dias no reator e valores limite comparativos

			02 nd Draft (DG Env.A.2, 2001)			Proposta de Norma Técnica (2005)		
Parâmetro	Limite de deteção (DL)	Registo	Classe 1	Classe 2	Resíduo biodegradável estabilizado	Classe I	Classe II	Classe III
Cd (mg/kg ms)	1,01	BDL*	0,7	1,5	5	0,7	1,5	5
Cr (mg/kg ms)	1,32	BDL*	100	150	600	100	150	600
Cu (mg/kg ms)	0,40	4,83	100	150	600	100	200	600
Hg (mg/kg ms)	1,96	BDL*	0,5	1	5	0,7	1,5	5
Ni (mg/kg ms)	0,87	BDL*	50	75	150	50	100	200
Pb (mg/kg ms)	0,59	1,07	100	150	500	100	150	500
Zn (mg/kg ms)	0,391	40,34	200	400	1500	200	500	1500

*below detection limit

O limite de deteção foi calculado para cada metal com base na sua reta de calibração. Analisando os resultados obtidos é possível aferir que o composto produzido encontra-se isento de metais pesados, visto que a maioria dos metais analisados apresenta concentrações muito baixas (abaixo do limite de deteção do próprio equipamento) e os restantes apresentam concentrações inferiores a todas as classes de qualidade nas duas normas apresentadas para comparação.

Relativamente ao mercúrio o composto pode estar também isento no entanto tendo em conta os limites de deteção obtidos não se podem retirar conclusões quanto aos mesmos. Tendo em conta estes resultados e a complexidade destes métodos não se verificou a necessidade de realizar estes testes novamente apesar de que teria sido interessante verificar a presença deste metal.

3.4 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

Tendo em conta a futura utilização dos compostos produzidos, surge a necessidade de se verificar a sua composição microbiológica uma vez que a aplicação de compostos com concentrações excessivas de patogénicos inviabiliza a utilização dos mesmos devido ao perigo associado à saúde pública.

Em relação aos microrganismos patogénicos, apenas se encontram valores limitativos par a *Salmonella* spp e para a *Escherichia coli* nos dois documentos de referência para a utilização dos compostos em Portugal. Um composto deverá apresentar como valor máximo admissível de 1000 g de *Escherichia coli* na Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto e deve estar ausente de *Salmonella* spp em 25 g de composto na Proposta de

Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto (Gonçalves e Baptista, 2005) e ausente em 50 g segundo o 2nd Draft of Biological Treatment of Biowaste – Working Document (DG Env. A.2., 2001).

No entanto, estes dois parâmetros revelam-se um pouco insuficientes o que provocou a reação de muitos autores e instituições que propuseram valores de referência com o intuito de salvaguardar da qualidade microbiológica dos compostos (Santos, 2007).

Strauch (1987) propôs como valores limite para os enterococos: 5×10^3 , enterobactérias: 5×10^2 e ausência de *Salmonella* spp em 100 g de composto como ausência de parasitas.

A presença de enterobactérias e *Salmonella* spp não foi possível avaliar nas instalações disponíveis devido a já não existirem os meios de crescimento adequados. Havia constantemente contaminações associadas a estes microrganismos os responsáveis pelos laboratórios optaram por deixar de realizar a sua análise.

A análise microbiológica realizada nesta dissertação inclui a análise não só do composto como também de outras duas zonas do reator que se encontravam a temperaturas diferentes (assumindo-se que estavam em diferentes etapas da degradação). Desta forma procurou-se analisar a variação dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica a diferentes temperaturas.

Para tal, procedeu-se à análise para estes 3 pontos da concentração de fungos, actinomicetes e heterotróficos. Com o intuito de verificar a qualidade do composto retirado do reator, realizou-se ainda a análise da presença de coliformes totais (verificando a presença de *Escherichia coli* através da realização de testes confirmativos) e a presença de Enterococos.

Desta forma as amostras recolhidas correspondentes ao composto foram incubadas a 30 °C, as amostras do ponto 1, foram incubadas a 40 °C e as do ponto 2 a 60 °C de forma a manter a temperatura semelhante aquela a que os microrganismos estavam sujeitos no interior do reator nas posições correspondentes. Após a incubação procedeu-se à contagem das unidades formadoras de colónias (UFC) para cada uma das amostras analisadas (7 diluições e uma amostra original). No anexo VI podem ser consultadas algumas imagens aos resultados obtidos após as respetivas incubações.

Tabela 3.3 - Análise microbiológica – Actinomicetes

Diluição	Caracterização das UFC's	Composto (30° C)	Ponto 1 (40°C)	Ponto 2 (60°C)
1	Biomassa esbranquiçada com actinomicete amarelo, circular, convexo	TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻¹		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻²		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻³		>100	TMTC	TMTC
10 ⁻⁴		>100	>100	TMTC
10 ⁻⁵		>100	15	>100
10 ⁻⁶		14	Ausência de crescimento	>100
10 ⁻⁷		2	Ausência de crescimento	46

Na tabela 3.3 encontram-se os valores correspondentes à presença de actinomicetes nas 3 temperaturas seleccionadas. Analisando a mesma é possível verificar que a presença destes microrganismos é favorecida pelo aumento da temperatura uma vez que se verificou um maior número de UFC's para o ponto 2, cuja incubação ocorreu a uma temperatura superior. No entanto, o Composto encontra-se a uma temperatura inferior ao ponto 1 mas apresenta uma maior quantidade de UFC's. Estes valores podem estar relacionados com a maior ou menor afetividade dos microrganismos para os diferentes estados de decomposição da matéria orgânica que em conjunto com a temperatura é um dos parâmetros que mais influência a diversidade microbiológica.

Tabela 3.4 - Análise microbiológica – Fungos

Diluição	Caracterização das UFC's	Composto (30° C)	Ponto 1 (40°C)	Ponto 2 (60°C)
1	Fungos brancos e amarelos, achatados, de diversos diâmetros	TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻¹		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻²		TMTC	>100	TMTC
10 ⁻³		TMTC	>100	>100
10 ⁻⁴		>100	>100	>100
10 ⁻⁵		>100	>100	90
10 ⁻⁶		>100	55	Ausência de crescimento
10 ⁻⁷		3	3	Ausência de crescimento

A quantidade de colônias detetadas é superior para o composto, cuja incubação se realizou a uma menor temperatura, como se pode analisar na tabela 3.4. Desta forma é possível aferir que os fungos existentes no reator de compostagem se desenvolvem melhor a uma temperatura de 30 °C.

Tabela 3.5 - Análise microbiológica – Heterotróficos

Diluição	Caracterização das UFC's	Composto	Amostra 1	Amostra 2
1	Colônias esbranquiçadas, convexas, de diversos diâmetros	TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻¹		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻²		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻³		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻⁴		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻⁵		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻⁶		TMTC	TMTC	TMTC
10 ⁻⁷		TMTC	TMTC	TMTC

A presença de heterotróficos nas amostras utilizadas é claramente notória não tendo sido possível determinar a quantidade das mesmas apesar de se terem realizado 7 diluições como se pode verificar na tabela 3.5. Por motivos de tempo e complexidade do processo optou-se por não se realizar mais diluições visto que se teria que iniciar o processo de novo uma vez que era imperativo autoclavar material.

Tabela 3.6 - Análise microbiológica – Coliformes totais e Enterococos no composto

Diluição	Caracterização das UFC's	Coliformes totais	Enterococos
1	Coliformes totais: Colônias roxas, convexas, de pequeno diâmetro Enterococos: Colônias escuras, achatadas, de diâmetro médio	TMTC	>100
10 ⁻¹		TMTC	38
10 ⁻²		>100	4
10 ⁻³		40	Ausência de crescimento
10 ⁻⁴		20	Ausência de crescimento
10 ⁻⁵		Ausência de crescimento	Ausência de crescimento
10 ⁻⁶		Ausência de crescimento	Ausência de crescimento
10 ⁻⁷		Ausência de crescimento	Ausência de crescimento

Analisando a tabela 3.6 é possível verificar que a presença destes microrganismos é muito inferior aos analisados anteriormente, o que é perceptível tendo em conta as funções representadas pelos mesmos.

A presença de colónias típicas de Enterococos foi verificada através da realização de testes confirmativos que revelou a presença dos mesmos no composto para além de Enterococos também foram detetados outros microrganismos que foram excluídos da contagem.

A presença de coliformes fecais foi realizada com o intuito de se verificara a presença de Escherichia coli através da realização de testes confirmativos. A presença de Escherichia coli só é verificada se se confirmarem 4 caraterísticas da mesma, a presença de cor amarela, turvação, gás no tubo de fermentação e fluorescência quando sujeita a radiação ultravioleta. Como neste caso, não se verificou a mudança de cor para amarelo excluiu-se a presença de Escherichia coli sem se verificarem as outras caraterísticas

Tabela 3.7 - Análise microbiológica – Contagens UFC

	UFC's/g (base seca)		
Parâmetro	Composto (30° C)	Ponto 1 (40°C)	Ponto 2 (60°C)
Actinomicetes	3,91E+06	1,44E+05	4,43E+07
Fungos	1,17E+07	2,39E+06	3,25E+06
Heterotróficos	TMTC	TMTC	TMTC
Coliformes Totais	1,56E+04	--	--
Enterococos	1,48E+02	--	--

A partir dos dados obtidos durante os ensaios foi possível calcular a quantidade de organismos (UFC) presente na amostra considerada como podemos analisar na figura 3.7. Apesar das limitações existentes ao nível de obtenção dos parâmetros limitantes para os diferentes microrganismos

A amostra de produto final analisada (composto) apresenta uma concentração de enterococos inferior ao limite proposto na literatura (5×10^3 enterococos/g seca) e apresenta ausência de Escherichia coli.

3.5 QUALIDADE DO COMPOSTO – TESTE DE CRESCIMENTO

Procurou-se realizar os testes mais conhecidos para verificar a estabilidade do composto. No entanto, desses testes, apenas se realizou o teste de crescimento uma vez que o fator tempo teve um grande impacto na gestão das tarefas realizadas. O teste foi realizado com o agrião, como referido em alguma literatura, no entanto, este acabava por não germinar em 50% dos vasos como é exigido no procedimento do respetivo teste.

Este teste foi realizado 3 vezes recorrendo a diferentes conjuntos de sementes no entanto em nenhum dos testes se obteve sucesso.

Apostou-se desta forma na realização de um teste de crescimento com azevém (*Lolium perenne*). Segundo Gajdos (1997) as sementes de azevém apresentam um bom crescimento neste tipo de testes devido à sua facilidade de crescimento e fácil adaptação às condições climáticas.

O teste realizado com azevém permitiu a germinação de 50% dos vasos com um composto que teve 17 dias a maturar (apesar de ser um tempo de maturação muito curto foi impossível esperar mais para realizar o teste com uma amostras de composto mais maturado).

Os ensaios foram realizados recorrendo a um branco (sem adição de composto) e 5 vasos com 20%; 40%; 60; 80% e 100 % de composto. Para estes valores a composição com melhores resultados foi a correspondente a 20% de composto; no entanto, o Índice de Crescimento foi de 42% correspondendo à categoria C, que refere que o composto não apresenta qualidade para ser usado como corretivo orgânico e a sua utilização é restrita visto apresentar um IC inferior a 90 %.

A figura 3.20 corresponde aos resultados obtidos para este teste no último dia de crescimento (14 dias), começando da esquerda para a direita pelo vaso apenas com trufa, seguindo-se os vasos com 20%;40%;60%;80% e 100 % de composto,



Figura 3.20 - Fotografias do teste de Crescimento do azevém após 14 dias de crescimento

Seria importante realizar este teste após um período de maturação do composto de dois a três meses, visto que seria o tempo mínimo para garantir a estabilidade do mesmo. Para além disso também seria interessante realizar o teste com diferentes sementes, nomeadamente alface e rabanete uma vez que alguns autores realizaram os seus testes com estas mesmas sementes.

No anexo V da presente dissertação podem ainda ser consultadas algumas fotografias retiradas ao longo deste projeto que permitem uma maior visibilidade sobre as tarefas e resultados obtidos.

4 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho deu-se por concluído visto que consistia essencialmente no arranque do sistema de compostagem constituído por um reator já existente nas instalações da faculdade.

Em relação à temperatura pode-se afirmar que o seu comportamento esteve dentro dos valores esperados, excetuando na zona junto ao abastecimento de ar relacionada com a camada de material que aí se formou.

Os restantes parâmetros analisados para o sistema em causa revelaram bastantes incongruências com os valores registados na literatura, o que permite concluir que o processo de compostagem desenvolvido utilizando apenas como suporte a relva não apresentou uma eficiência elevada.

Dos parâmetros que apresentaram valores não expectáveis evidenciamos o teor de matéria orgânica e a razão carbono azoto uma vez que são parâmetros muito importantes cujo comportamento e valores atingidos foram muito contraditórios.

Os testes aplicados ao produto final revelaram que estes não demonstravam possuir metais pesados na sua constituição superiores aos valores referidos nos diversos documentos consultados, o mesmo aconteceu a nível microbiológico relativamente aos enterococos e escherichia coli.

Foi também realizado um teste de crescimento utilizando como base um composto que teve alguns dias de maturação, o que permitiu aferir que a sua utilização é restrita visto apresentar um IC inferior a 90 %.

Em suma, foram diversos os fatores que contribuíram para que esta eficiência fosse baixa, mas o fator principal a considerar é a mistura selecionada para alimentar o reator que devido à sua composição e características apresenta uma razão C/N baixa. O facto de apenas se ter utilizado um tipo de material pode ter influenciado a diversidade biológica, visto não haver variedade de nutrientes, provocando também problemas estruturais a nível de porosidade e espaços livres uma vez que a compactação foi bastante elevada.

5 PERSPETIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta secção de perspectivas para trabalhos futuros foi direccionada essencialmente para a identificação dos problemas e dificuldades detetados durante o arranque e posterior funcionamento do reator e possíveis estratégias/soluções para contornar estes problemas. Dividiu-se a análise em três pontos distintos, a geometria e acessórios do reator; o sistema de arejamento aplicado e por último a mistura de resíduos para compostagem.

REATOR E RESPETIVOS ACESSÓRIOS

Ao nível da recolha do composto foram identificados dois problemas principais. O reator de compostagem possuía uma configuração cilíndrica com fundo cónico, criado especialmente para facilitar a remoção do composto no reator. Esta configuração revelou-se no entanto um entrave para a remoção do composto, visto que devido à % de humidade elevada, a matéria orgânica ficou colada às paredes do cilindro, escorregando ao longo do mesmo, mas na intersecção entre a zona cilíndrica e cónica o material encontrou alguma dificuldade de escoamento e foi-se acumulando nesta zona.

A nível de dimensionamento propriamente dito, esta foi a grande dificuldade encontrada no funcionamento do reator visto que quando se realizou a união entre a zona cilíndrica e cónica não se tentou minimizar a aresta criada pela mesma. Nesta fase será certamente mais complicado solucionar este problema devido às dimensões do reator, mas a utilização de silicone para diminuir a aresta pode ser uma solução viável, económica e de fácil implementação.

Tendo em conta que a análise dos parâmetros era feita posteriormente à recolha das amostras, seria uma mais-valia a compra de um equipamento que permitisse medir a humidade de forma instantânea, visto que esta pode ser facilmente controlada através da adição de água, aumento do caudal de ar e até introdução de material com menor teor de água no reator.

Seria também interessante a criação de um sistema de rega automático, cujos comandos fossem controlados através do Labview. De referir que se procurou implementar este sistema ainda durante esta dissertação, mas devido ao fator tempo acabou por não ser executado.

Um dos acessórios que foi encomendado pelos alunos na altura foi um amostrador para a recolha de amostras. No entanto, ele apenas foi utilizado uma única vez neste projeto devido ao seu mau funcionamento. O amostrador em causa tem um diâmetro de cerca de 8 cm e funciona como uma seringa. No entanto, o sistema nunca conseguiu fazer a recolha eficaz das amostras, tendo sido esta realizada com o auxílio de uma Tenaz de grandes dimensões. Como tal, sugere-se a compra de um novo amostrador, com menor diâmetro (cerca de 3 cm) que permita atingir o centro do reator visto que a tenaz utilizada não permitia atingir o centro como se pretendia inicialmente.

Seria também interessante realizar, também em contínuo, a recolha de temperaturas em diferentes localizações do centro para se obter um perfil a diferentes alturas e a diferentes distâncias das paredes do reator, o que implicaria a compra de mais termopares.

Um outro problema detetado foi a dependência que se sentiu da alimentação do reator, visto que este só podia ser alimentado quando os responsáveis pela jardinagem efetuavam os respetivos cortes de relva e, como tal, havia semanas em que não havia relva para alimentar e outras alturas em que simplesmente não podíamos aceitar a relva visto o reator estar carregado. A solução passaria por falar com os serviços técnicos no início do ano letivo, pedindo, por exemplo, um contentor de relva por semana. Desta forma, o calendário do corte da relva poderia ser ajustado para dar resposta a este pedido.

Por último, ao longo do projeto concluiu-se que as dimensões do reator foram sobredimensionadas para a relva produzida nas instalações da faculdade. Devido a este mesmo fator, foram raras as vezes em que se conseguia manter o reator cheio visto que, como já foi referido, estávamos dependentes do fornecimento de relva..

SISTEMA DE AREJAMENTO

O sistema de arejamento foi concluído durante este projeto visto que a aquisição de peças e respetivas instalações não tinha sido ainda feito. No entanto, o próprio reator já possuía uma entrada para um tubo circular perfurado idealizado para fazer a distribuição do ar.

Apesar do reator estar preparado para ser arejado recorrendo a ar comprimido, chegou a ser ponderado realizar este arejamento com o auxílio de ventilador, chegando-se mesmo a pedir orçamentos para tal. No entanto após a análise dos mesmos optou-se por utilizar o ar comprimido disponível nas instalações e fazer o restante dimensionamento.

A dada altura reparou-se que o material que provinha do centro do reator apresentava-se muito seco e esbranquiçado, não tendo sido completamente compostado. Inicialmente pensou-se que este aspeto do material estava relacionado com a introdução do ar comprimido no centro, tendo-se apostado na adição de água para contrariar a secagem desta zona. As fotografias desta camada podem ser consultadas no anexo VI.

No entanto, mais tarde quando se procedeu ao esvaziamento do reator de compostagem percebeu-se que a água adicionada não poderia fazer nada para contrariar esta secagem do material central visto que à volta do sistema de distribuição do ar se tinha criado uma camada de resíduo muito densa que, devido à constante passagem de ar, ficou completamente seca. Esta camada era de grandes dimensões e impedia que os resíduos descessem pelo centro, sendo que isto só acontecia pelas laterais que era onde a humidade estava dentro dos valores mais altos.

Esta camada pode ter sido criada devido ao excesso de ar adicionado ao reator que foi promovendo a secagem do material na zona de introdução de ar criando a referida barreira. Apesar de se terem realizado os cálculos de oxigénio necessário para degradação da matéria orgânica, não foram retirados dos mesmos as necessidades de ar satisfeitas pelo facto de o reator estar aberto na extremidade superior e inferior o que pode ter causado um excesso de ar

introduzido. O excesso trás problemas ao nível da secagem visto que nos espaços onde a água poderia passar estava a passar ar.

Outra situação relacionada com este sistema de introdução de ar prende-se com a criação de gradientes de distribuição do ar uma vez que o ar tende a passar pelas zonas menos compactas contribuindo para a criação de anaerobiose nas restantes zonas. Para além disso, o tubo perfurado apresentava perfurações para a zona superior, inferior e centro, no entanto não havia perfurações orientadas para as paredes como seria esperado.

Existem duas possíveis medidas a tomar em relação a este problema. A mais económica seria a realização de mais furos no tubo de distribuição. No entanto isto não garante que não se volte a formar uma camada em redor do mesmo tubo, uma vez que este continua a ser um entrave ao escoamento da matéria orgânica. A outra opção passaria por remover o sistema de distribuição do ar existente e adquirir um ventilador (para colocar no topo do reator) que permitiria a passagem do ar mais uniformemente pelo reator uma vez que a tendência para a criação de perfis acaba por ser menor.

Poderia ser adicionado ainda um sistema de revolvimento para interromper a criação de perfis preferenciais mas esta opção traria duas limitações importantes. A primeira é que com um sistema de revolvimento tinha mesmo que se optar por um ventilador, uma vez que a estrutura já existente teria que ser removida; a outra condicionante seria impedir o funcionamento em contínuo uma vez que com o revolvimento a estratificação seria alterada e seria impossível continuar a atuar em contínuo com este sistema.

RESÍDUOS PARA COMPOSTAGEM

Nestes ensaios apenas se utilizou relva para compostar, apesar de inicialmente se ter procedido à recolha de borra de cafés, restos de vegetais e frutas e ramos e folhas secas. No entanto, como segundo a bibliográfica consultada o valor de C/N da erva acabada de cortar se aproximava do valor ótimo, optou-se por simplificar o processo e utilizar apenas este material.

Para uma maior eficácia do sistema deveria então optar-se por uma mistura de resíduos de diferentes tamanhos, densidades, áreas intersticiais, percentagem de humidade e razões C/N. Para tal bastava que se utilizassem os restantes resíduos biodegradáveis produzidos na faculdade (como aqueles que foram recolhidos neste projeto), calculassem as percentagens necessárias de cada um para se atingir uma razão C/N de 25-30 com base nas suas próprias razões. A alimentação ao reator desta forma seria realizada por camadas e permitiria manter sempre o reator abastecido até ao topo visto diminuir as necessidades de relva.

6 BIBLIOGRAFIA

- APHA. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- ASTM D2216-98. (1998). *Standard test method to determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*.
- ASTM D2974-13. (2013). *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils*.
- ASTM D792, ISO 1183. (2013). *Density and Specific Gravity*.
- Batista J.G.F. & Batista E.R.B. (2007). *Compostagem: Utilização de Compostos em Horticultura*. Angra do Heroísmo: Universidade dos Açores-CITA-A.
- Cardenas, RR & Wang, L.K. (1980). *Handbook of Environmental Engineering-Composting Process*. Volume II. New York: The Human Press.
- Cordeiro, N.M. (2010). *Compostagem de resíduos verdes e avaliação da qualidade dos compostos obtidos- caso de estudo da algar S.A*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia - Universidade técnica de Lisboa, Portugal.
- Coucello, V.C.C.P. (2007). *Necessidades de arejamento no processo de compostagem*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente: Faculdade de ciências e tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Cunha - Queda, A.C.F. (1999). *Dinâmica do azoto durante a compostagem de materiais biológicos putrescíveis*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia - Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho. Diário da República nº 116 - 1ªSérie. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa
- Department Of Environment (1987). *Methods for de Examination of waters & Associated Materials*. Stationary Office Books.
- Dias, J. (2012). *Revisão de Conceitos – Resíduos, Tecnologias e Sistemas de Tratamento de Resíduos Sólidos I*. Porto: FEUP.
- Dinis, M. (2008). *Dados sobre peso específico e teor de humidade típicos para resíduos residências, comerciais, industriais e agrícolas*. Acedido a 8 de Junho de 2014, Disponível em <http://www2.ufp.pt/~madinis/RSol/Cap%20III/Conjunto%20CapIII.pdf>
- DG Env. A.2. (2001). *Biological treatment of biowaste, 2nd Draft of biological treatment – Working document*.

EN13037:1999. (1999). *Soil improvers and growing media-Determination of pH*.

EN13038:1999. (1999). *Soil improvers and growing media-Determination of electrical conductivity*.

Epstein, E. (1997). *The Science of Composting*. CRC Press.

Fairbrother A. & Kapustka L.A. (1997). *Hazard classification of inorganic substances in terrestrial systems*. Ottawa, Canadá: Internations Council on Metals and the Environment. (cit. Felícia, 2009).

Felícia, D.G. (2009). *Estudo do comportamento do resíduo papel no processo de compostagem*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento: Universidade de Aveiro, Portugal.

Fernandes, M.J.C. (2012). *Avaliação do processo a implementar numa central de compostagem: formulação de misturas de resíduos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Universidade do Porto, Portugal.

Fonseca, J. (2012). *Efeito da adição de borras de café sobre a compostagem de resíduos de Acacia dealbata L. (mimosa)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto douro, Portugal.

Formosinho, S., Pio, C., Barros, J. & Cavalheiro, J. (2000). *Parecer Relativo ao Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos*. Aveiro: Comissão Científica Independente de Controlo e Fiscalização Ambiental da Co-Incineração.

Gajdos, R. (1997). *Effects of two composts and seven commercial cultivation media on germination and yield*. Compost Science and Utilization.

Gomes, A.P.P. (2011). *Monotorização de uma instalação laboratorial de compostagem*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química: Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Portugal.

Gonçalves, M.J.S. & Batista, M. (2001). *Proposta de Norma Portuguesa Regulamentação sobre a Qualidade do composto para utilização na Agricultura*. Lisboa: Laboratório Químico Agrícola.

Gonçalves, M. S., B, Batista, M. (2005). *Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto*. Lisboa: Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva/ INIA.

Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Torrance: Lewis Publishers.

Instituto Nacional de Estatística (2014). (INE) web site. Acedido a 5 de Junho de 2014, em Disponível em <http://www.ine.pt/>

Jodice, R. (1989). *Procedings of the Compost Production and Use Internacional Symposium: Parametri chimici e biologici per la valuatazione della qualità del compost*. Italy. (cit. Santos, 2007).

Júnior, E. (2012). *Projeto industrial para aeração automática de leiras de compostagem orgânica*; Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal da Uberlândia, Brasil.

- Krogmann, U. & Körner I. (2008). *Biotechnology: Environmental Processes III: Technology and Strategies of Composting, in Biotechnology*. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- LAGA – Berkblatt M 10. (1995). *Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost. Müll-Handbuch Lfg.* Berlin: Erich Schmidt Verlag. (cit. Cunha-Queda, 1999).
- Levy, J. & Cabeças, A. (2006). *Resíduos Sólidos e Urbanos: Princípios e Processos*. AEPsA
- Mendes, A.F.T. (2009). *Estudo técnico-económico de uma unidade de co-compostagem de lamas de ETAR*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Universidade do Porto, Portugal.
- Merkel, J.A. (1981). *Composting In: Managing livestock wastes*. AVI. (cit. Cunha - Queda, 1999).
- Ministério do Ambiente (2013). *Proposta PERSU 2020 - Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos - “Uma fonte renovável de recursos”*. Lisboa: Ministério do Ambiente, Ordenamento de Território e Energia.
- National Instruments (2014). (NI) web site. Acedido a 8 de Junho de 2014, Disponível em <http://portugal.ni.com>
- Portaria nº 15/96 de 23 de Janeiro. Diário da República – I Série –B. Ministério do Ambiente.
- PROSAB (1996). *Manual prático para a compostagem de bio sólidos*. Londres: Universidade Estadual Londrina.
- Russo, M.A.T. (2003). *Tratamento de resíduos sólidos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil: Faculdades de Ciências e Tecnologias - Universidade de Coimbra, Portugal.
- Santos, J.D. (2007). *Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Zoologia e Antropologia: Faculdade de Ciências - Universidade do Porto, Portugal.
- Shammas, N.K. & Wang L.K. (2008). *Handbook of Environmental Engineering: Biosolids Treatment Processes*, Volume 6. Humana Press. (cit. Fernandes, 2012).
- Sousa, D.M.F. (2008). *Aplicação do processo de compostagem na estabilização de dejectos de coelho*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento - Universidade de Aveiro, Portugal.
- Strauch, D. (1987). *Overview of recent developments in organic sludge management - Hygienic Aspects of the Treatment and Use of Organic Sludge and Liquid Agricultural Wastes*. Dublin: Proceedings of a CEC Workshop.
- Tchobanoglous G. et al. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. New York: MC Graw-Hill.
- Teixeira M. (2007). *Gestão de Resíduos – Introdução à Engenharia do Ambiente. Algarve: Universidade do Algarve*.

Ventura, M. (2009). *Modelização de um processo aeróbico de tratamento biológico de resíduos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento - Universidade de Aveiro, Portugal.

Zucconi, F.& Bretoldi, M. 1987. *Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste*. In: *Compost: production, quality and use*. Londres: Elsevier Applied Science Publishers.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO I

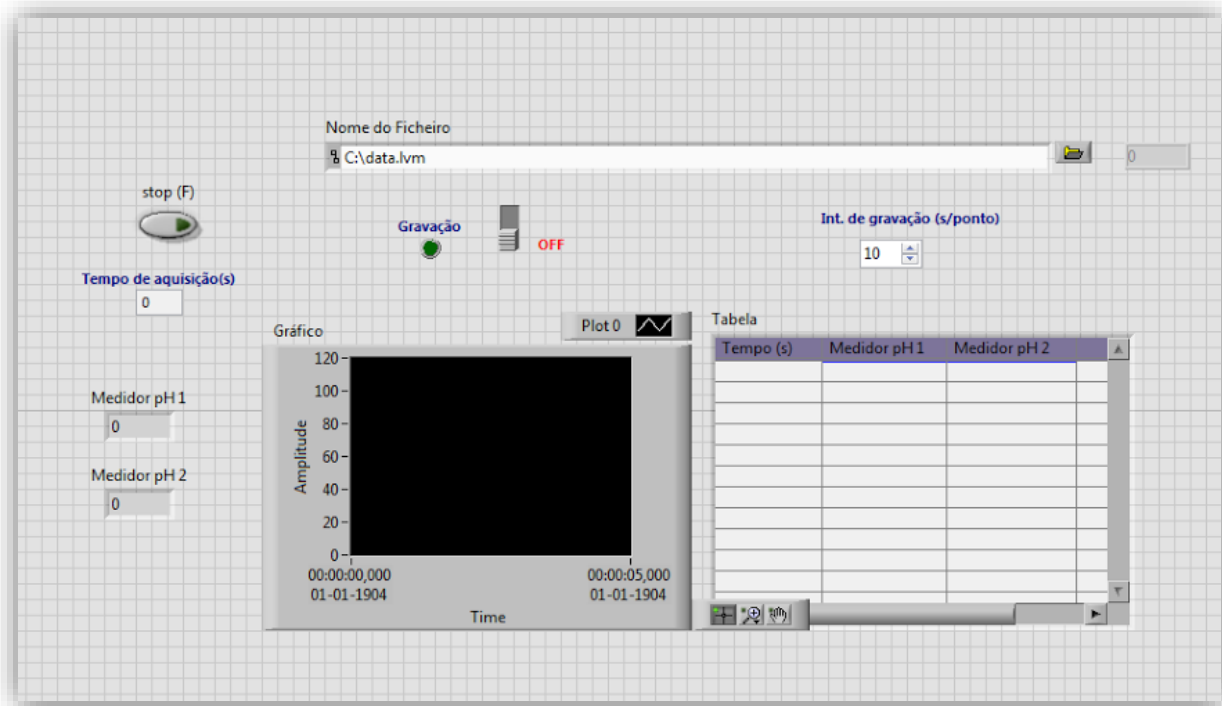


Figura I.1 - Layout obtido para a medição da temperatura – Digestão anaeróbia

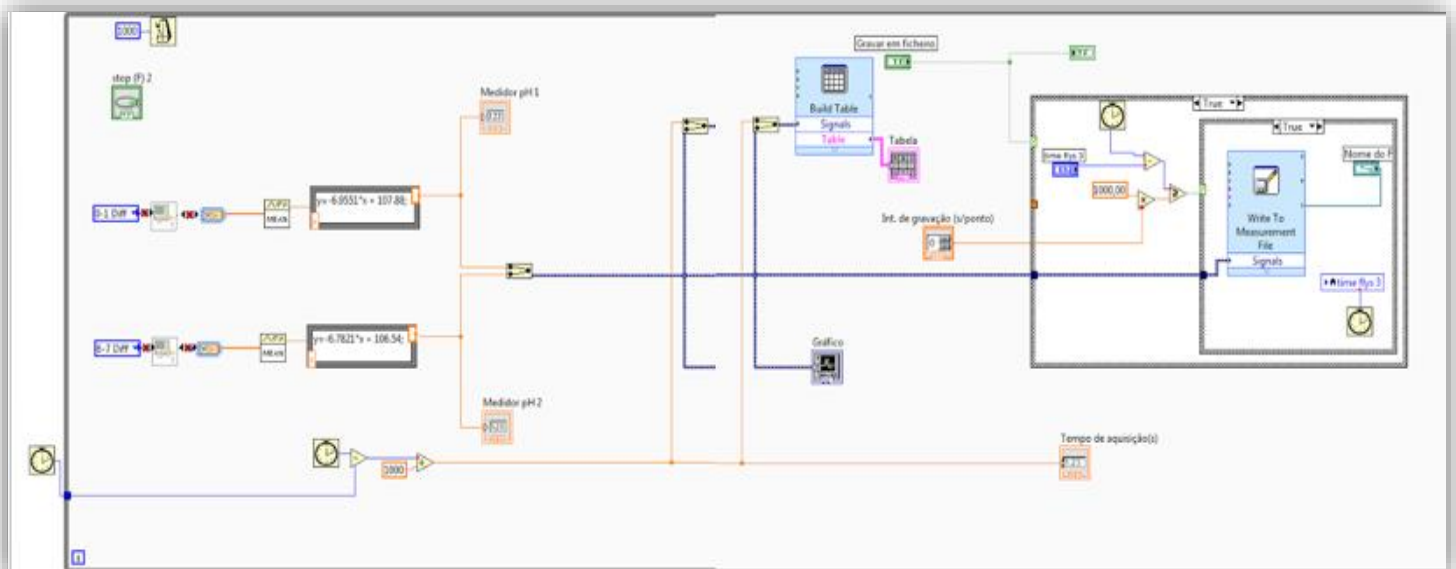


Figura I.2 - Esquema de Labview para aquisição de temperatura – Digestão anaeróbia

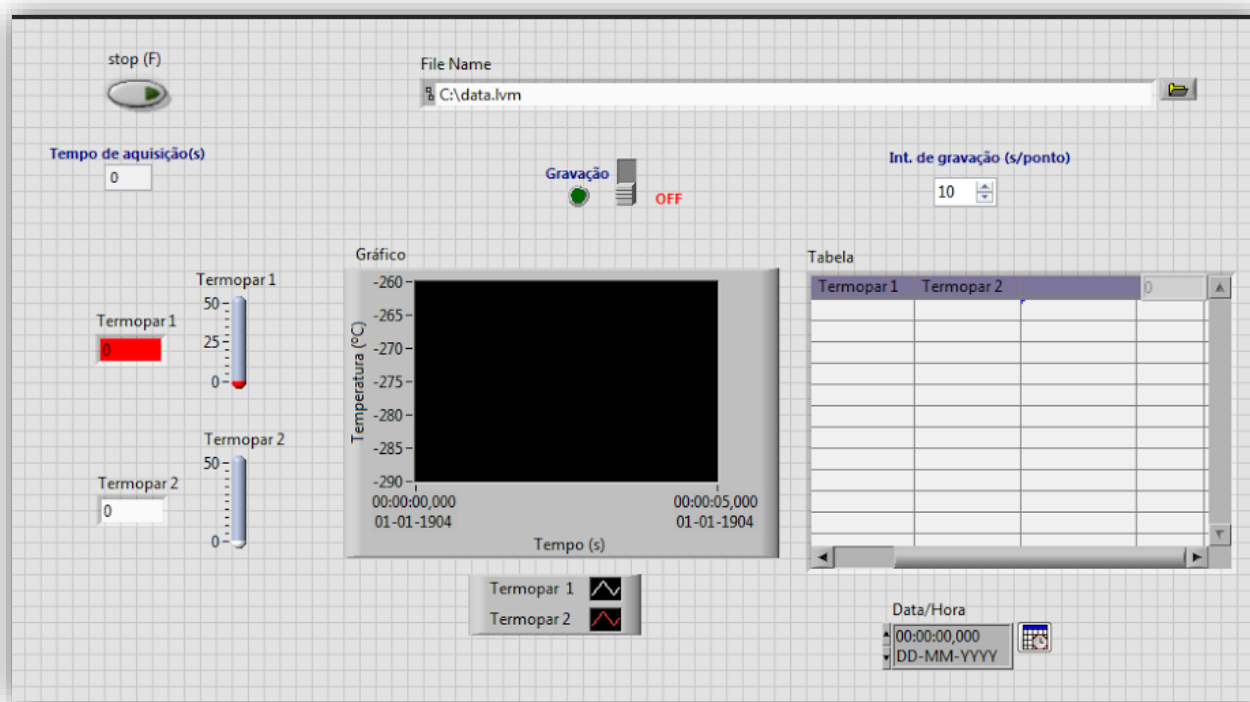


Figura I.3 - Esquema de Labview para aquisição de temperatura – Digestão anaeróbica

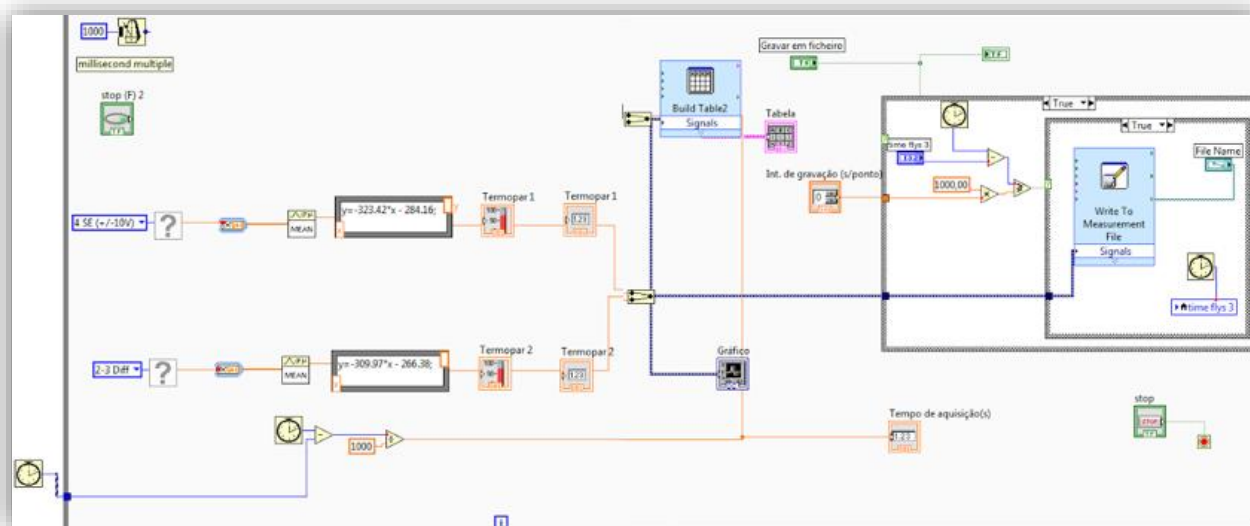


Figura I.4 - Esquema de Labview para aquisição de pH – Digestão anaeróbica

7.1 ANEXO II

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

Este ensaio foi adaptado para as condições e equipamentos disponíveis e foram realizados duas réplicas por amostra segundo o seguinte procedimento:

Procedimento experimental:

1. Registrar a massa de uma cápsula previamente calcinada;
2. Pesar uma quantidade representativa de amostra de composto;
3. Colocar na estufa a 105 °C, durante 24 horas;
4. Após a secagem, arrefecer no exsicador até temperatura ambiente e pesar;

O cálculo da percentagem de humidade seguiu a seguinte equação:

$$H(\%) = \frac{\text{massa amostra húmida} - \text{massa amostra seca}}{\text{massa amostra húmida}} \times 100 \quad (8)$$

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

O procedimento foi realizado em duplicado e utilizou-se as cápsulas com resíduos secos na estufa resultantes do método para determinação da humidade.

Procedimento experimental:

1. Colocar na mufla durante 4 horas a 550 °C as cápsulas secas decorrentes da determinação do teor de humidade;
2. Após este período, deixar arrefecer o cadinho no exsicador até à temperatura ambiente e pesar;

O Cálculo do teor de matéria orgânica seguiu a seguinte equação:

$$MO(\%) = \frac{\text{massa amostra seca} - \text{massa amostra calcinada}}{\text{massa amostra seca}} \times 100 \quad (9)$$

DETERMINAÇÃO DO PH

. Para este teste foi apenas realizado um ensaio seguindo-se o seguinte procedimento:

Procedimento experimental:

1. Pesar uma quantidade de amostra equivalente a 60 ml de volume utilizando um gobelé;
2. Adicionar 300 ml de água destilada à massa pesada;
3. Colocar o frasco a agitar a suspensão num agitador durante 1 hora a rotação constante;
4. Efetuar a medição de pH no respetivo equipamento, após sua calibração;

DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA – ρ

Para a realização destes ensaios utilizam-se picnómetros que são materiais de vidro com baixo poder de dilatação. Cada amostra foi testada em duplicado seguindo o seguinte procedimento:

Procedimento experimental:

1. Pesar um picnómetro de 25 ml;
2. Colocar água destilada no picnómetro e pesar;
3. Pesar 0,25 g de amostra num vidro de relógio;
4. Esvaziar o picnómetro;
5. Colocar a amostra no picnómetro e perfazer com água destilada voltando a pesar;

CARÊNCIA QUÍMICA DE OXIGÉNIO – CQO

Como este método é frequentemente utilizado para líquidos surgiu a necessidade de fazer a sua adaptação para sólidos, tendo sido testadas diferentes quantidades de amostra até se verificar a digestão da mesma durante o processo.

Procedimento experimental:

1. Pesar 30 mg de amostra num vidro de relógio;
2. Colocar a massa de amostra num tubo de CQO com a ajuda de 20 ml de água destilada;
3. Colocar em cada tubo 0,4 mg de sulfato de mercúrio (HgSO_4);
4. Adicionar 5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado a cada tubo na hotte;
5. Adicionar 10 ml de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a cada tubo;
6. Adicionar 25 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4);

7. Colocar a digerir na placa de aquecimento durante cerca de 2 horas;
8. Preparar uma solução titulante de sulfato de amónio ferroso (FAS) e um branco sempre que se prepara um novo reagente para os ensaios;
9. Após a digestão, deixar arrefecer e colocar 4 gotas do indicador ferroína nos preparados, branco e FAS;
10. Titular os preparados, o FAS e os brancos com Sulfato de Ferro Amoniacal;

O Cálculo da Carência Química de Oxigénio seguiu a seguinte equação:

$$CQO (g/g) = \frac{(Volume Branco - volume Amostra) \times f \times 8000}{massa Amostra} \quad (10)$$

$$f = \frac{0,25 \times Volume dicromato adicionado (10 ml)}{Volume consumido (FAS)} \quad (11)$$

DETERMINAÇÃO DO FREE AIR SPACE

Este parâmetro foi determinado seguindo o procedimento utilizado por Annan (1998) que se baseia numa equação empírica:

$$FAS = 1 - DB \left[\frac{1 - MS}{\rho H_2O} + \frac{MS \times MO}{\rho p} + \frac{MS(1 - MO)}{\rho c} \right] \quad (12)$$

Onde, DB é a densidade bulk (massa volúmica); MS é a fração de matéria seca; MO é o teor de matéria orgânica (%); ρH_2O é a massa volúmica da água (1000 kg/m³); ρp é a massa volúmica das partículas (2500 kg/m³) e ρc é a massa volúmica das cinzas (1600 kg/m³).

Os valores correspondentes ao DB e o MO foram retirados dos testes realizados ao teor de humidade e ao teor de matéria orgânica, respetivamente, e o valor do MS foi calculado com base na matéria seca e húmida pesada no teste do teor de humidade.

DETERMINAÇÃO DA RAZÃO C/N PELA ANÁLISE ELEMENTAR

Cada amostra precisa de um tempo de análise de 1000 segundos e após todas as amostras terem sido caracterizadas desliga-se o equipamento e procede-se à recolha de dados, ou seja, à recolha da área do pico de cada elemento, para todas as amostras, incluindo os padrões.

Com as áreas medidas dos padrões calcula-se o k (fator de proporcionalidade) para cada um dos 4 elementos em análise e determina-se o $k_{\text{médio}}$ após exclusão dos valores cujo desvio-padrão é muito superior aos restantes. Este k médio foi calculado da seguinte forma:

$$k = \frac{\text{massa amostra} \times \text{fracção elemento no padrão}}{\text{Área de pico do elemento}} \quad (13)$$

Com este k (calculado para cada um dos 4 elementos) calculou-se a percentagem dos elementos de cada uma das amostras através da seguinte fórmula:

$$\% \text{ elemento} = \text{massa amostra} \times k_{\text{médio}} \text{ elemento} \times \text{área do pico do elemento} \quad (14)$$

Após calcular a percentagem de cada um dos elementos da amostra, calculou-se a percentagem do oxigénio (O) pela diferença, considerando que estes 5 elementos são os únicos presentes na amostra.

DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS

Procedimento experimental – Metais exceto Mercúrio

1. Pesar 2.5 g de amostra para um tubo de digestão;
2. Adicionar 5 ml de H₂O
3. Adicionar 12 ml de HCL e 4 ml de HNO₃;
4. Colocar a digerir durante 2 horas numa placa de aquecimento;
5. Filtrar as amostras a vácuo;

Procedimento experimental – Mercúrio

1. Pesar 1,00±0,05 g de composto para 1 balão de amostra seca a 50 °C;
2. Adicionar 10,0±0,5 ml de 50% v/v de HNO₃|H₂SO₄
3. Colocar 2 horas em banho-maria a 60 °C tapando o balão com vidro de relógio com agitação de vez em quando;
4. Retirar do banho-maria e deixar arrefecer 1 hora;
5. Adicionar 20,0 ml de H₂O destilada pelas paredes do balão seguindo-se leve agitação;
6. Arrefecer em banho gelado;
7. Adicionar alíquotas de 5 ml de KMnO₄ até perfazer 15 ml;

8. Retirar do gelo e deixar pelo menos 15 horas tapado à temperatura ambiente;
9. Adicionar 4 ml (2 em 2) de cloreto de hidróxido de amônio seguindo-se uma agitação;
10. Deixar destapado durante 1 hora em repouso;
11. Filtrar a vácuo e colocar em balão de 100 ml

Após a digestão de todas as amostras o procedimento foi semelhante:

1. Utilizar cerca de 7 padrões no equipamento para construir a reta de calibração (máximo 10);
2. Realizar a análise dos metais segundo as instruções do sistema informático;
3. Caso a amostra se encontre fora da reta realizar ensaios com diferentes massas (neste caso: 1g; 0,5g e 0,03 g)
4. Retirar a reta de calibração e fazer a respetiva análise dos dados tendo em conta os valores obtidos para a água destilada.

ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS

Para cada amostra realizou-se a análise de 7 diluições para além da amostra original. Para tal foi necessário preparar os meios de cultura propícios para o crescimento dos microrganismos para 128 caixas de petri no dia anterior. Um dos meios de cultura apenas foi preparado no dia visto que a sua técnica de aplicação é diferente das restantes. Para além da preparação dos meios foi necessário proceder à desinfeção do material que viria a ser utilizado bem como do material necessário para a recolha das amostras (necessário utilizar a autoclave).

Foram ainda preparados 10 tubos confirmativos para os coliformes (Flunocult) e 10 caixas de petri para os Enterococos (BA).

A recolha das amostras foi realizada para recipientes estéreis “shots” sendo que para cada ponto de amostragem foram recolhidos 10 amostras e posteriormente misturadas para garantir a homogeneidade dos resultados utilizando-se aproximadamente 10 gramas de cada amostra. A cada recipiente foi adicionado 90 ml de salina estéril e procedeu-se à sua agitação durante 1 hora, seguindo-se meia hora de decantação.

As diluições foram realizadas através da recolha de 1 ml de amostra original para um tubo ao qual se adicionou 9 ml de salina estéril (processo realizado à chama). A esta diluição foi recolhido 1 ml e adicionado a um novo tubo com 9 ml de salina estéril, continuando este processo até se atingir a diluição pretendida, desta forma da 10^{-1} obteve-se a 10^{-2} e assim sucessivamente até a 10^{-7} .

7.2 ANEXO III



Figura III.1 - Calcinação de amostras na mufla



Figura III.4 - Técnica de picnometria



Figura III.2 - Equipamento determinação metais pesados



Figura III.5 - Amostras no exsiccador



Figura III.3 - Análise microbiológica - filtração



Figura III.6 - Caixas de Petri com meios de cultura

7.3 ANEXO IV

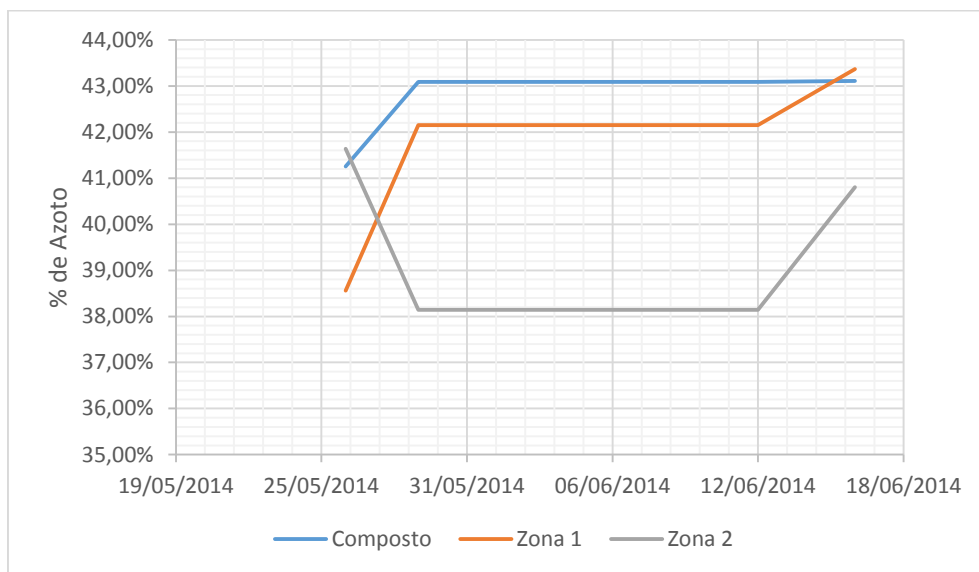


Figura IV. 1 - % de Carbono obtidas para as diferentes amostras

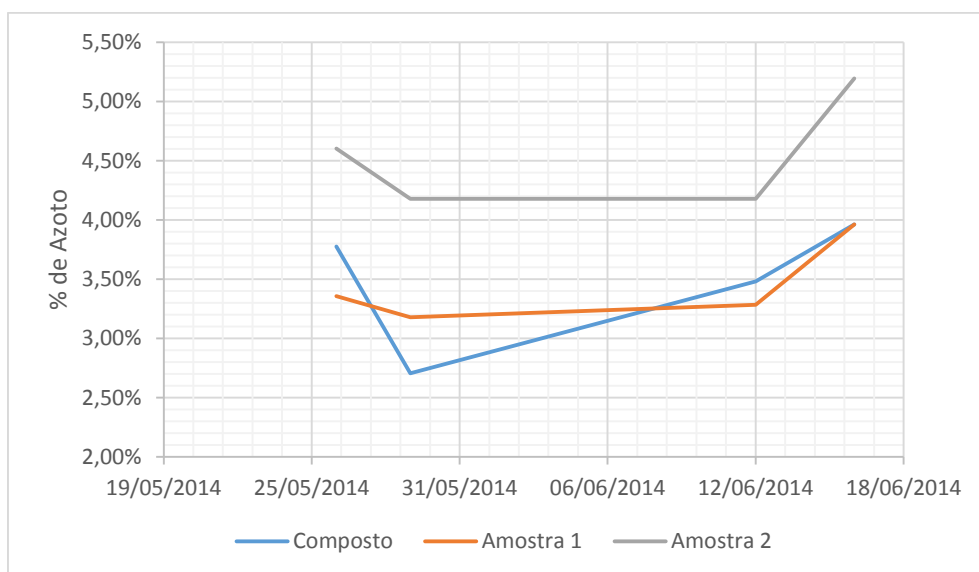


Figura IV.2 - % de Azoto obtidas para as diferentes amostras

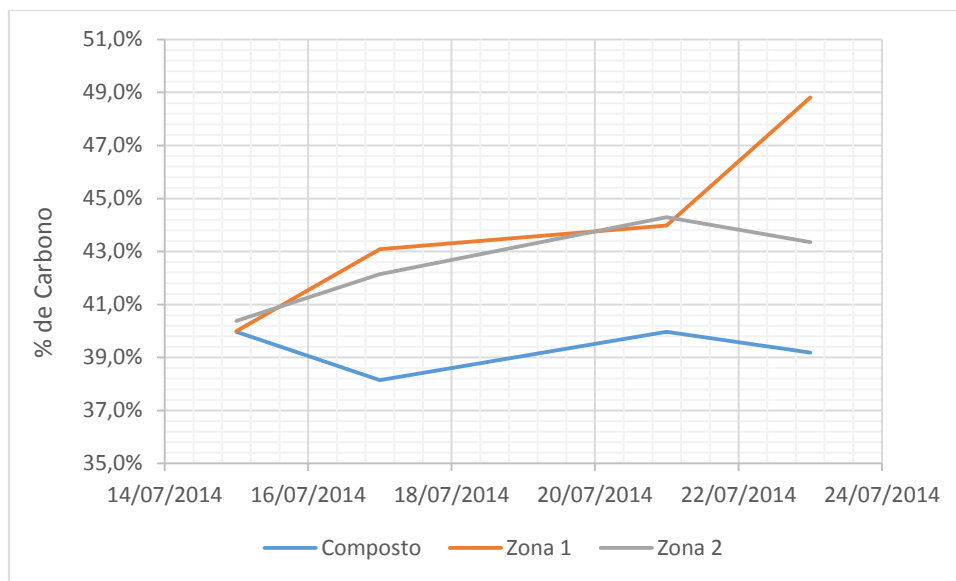


Figura IV.3 - % de Carbono obtidas para as diferentes amostras – Cenário II

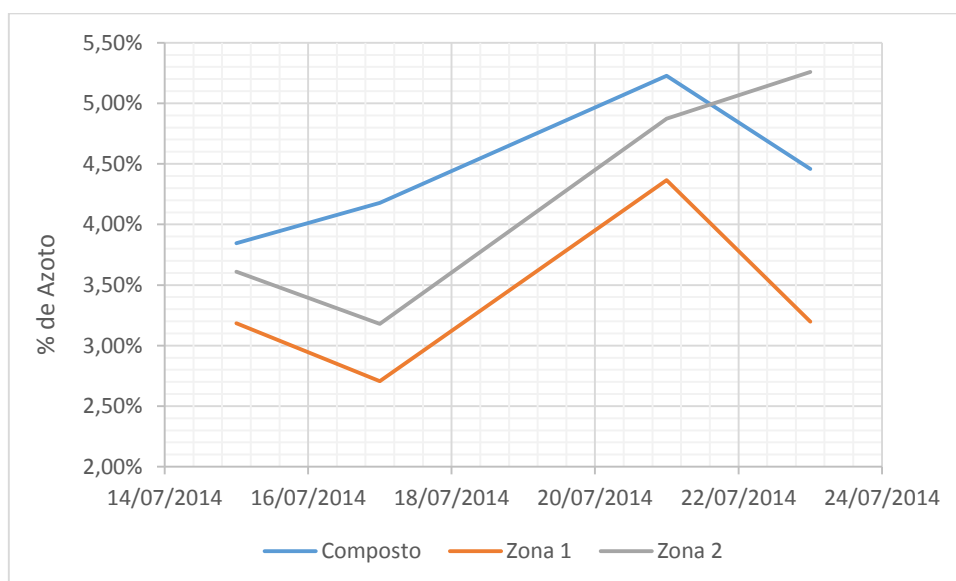


Figura IV.4 - % de Azoto obtidas para as diferentes amostras – Cenário II

7.4 ANEXO V

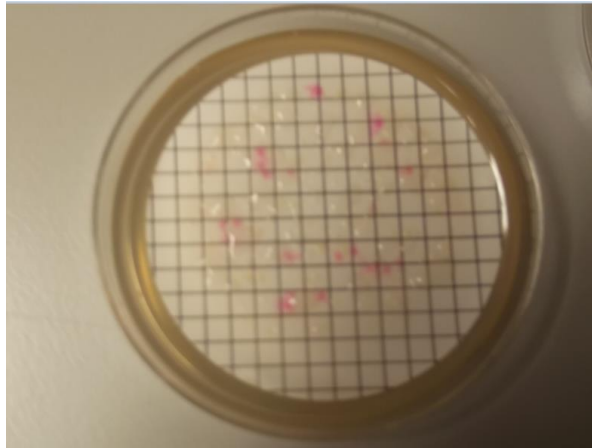


Figura V.1 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para Actinomicetes

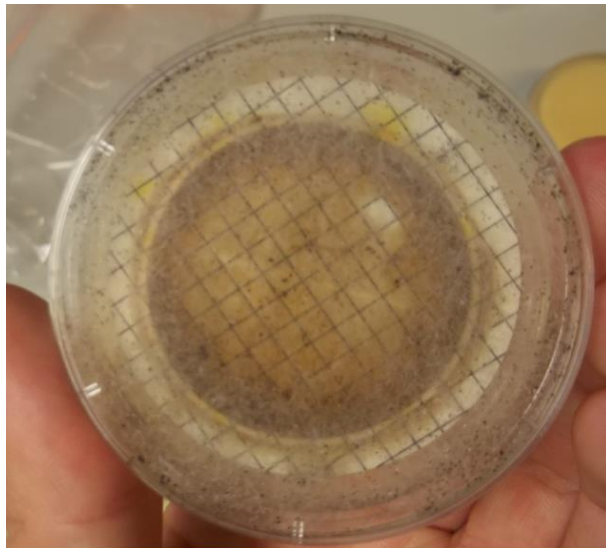


Figura V.2 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para Fungos

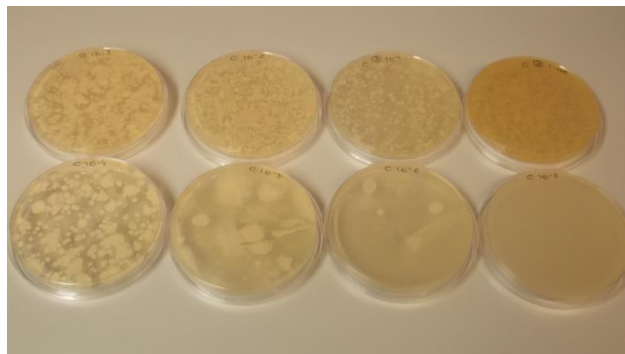


Figura V.3 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para Heterotróficos

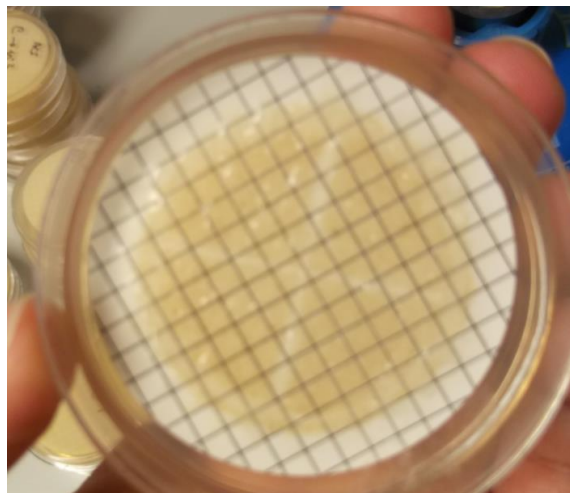


Figura V.4 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para *Enterococos*

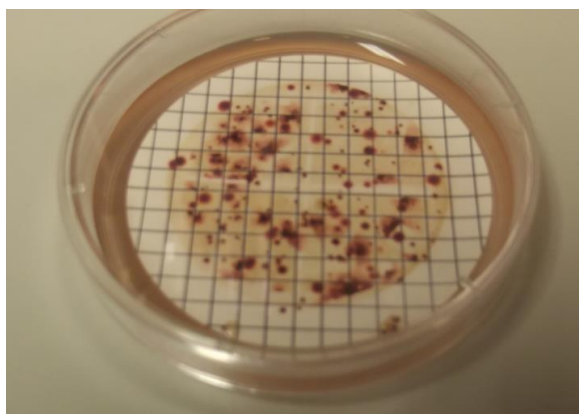


Figura V.5 - Fotografia representativa dos resultados obtidos para *Coliformes*

7.5 ANEXO VI



Figura VI.1 - Fotografia de cogumelos dentro do reator



Figura VI.2 - Fotografia da zona compacta formada à volta do sistema de arejamento



Figura VI.3 - Pilha de composto após esvaziamento total do reator



Figura VI.4 - Fotografia de Azevém após 14 dias de ensaio



Figura VI.5 - Fotografia de composto após 20 dias no reator